



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO
CAMPUS DIADEMA



ISABELA ALINE FERNANDES COSTA

**ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS
AMBIENTAIS E OS COMPOSTOS GEOSMINA E 2-
METILISOBORNEOL NO RESERVATÓRIO JUNDIAÍ DO
SISTEMA ALTO TIETÊ DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

DIADEMA

2019

ISABELA ALINE FERNANDES COSTA

**ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS
AMBIENTAIS E OS COMPOSTOS GEOSMINA E 2-
METILISOBORNEOL NO RESERVATÓRIO JUNDIAÍ DO
SISTEMA ALTO TIETÊ DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como exigência parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química, ao Instituto de
Ciências Ambientais, Químicas e
Farmacêuticas da Universidade Federal
de São Paulo – Campus Diadema.

Orientador: Prof. Dr. Werner Siegfried
Hanisch

DIADEMA

2019

Ficha catalográfica

Costa, Isabela Aline Fernandes

Estudo da relação entre os parâmetros ambientais e os compostos Geosmina e 2-Metilisoborneol no reservatório Jundiá do Sistema Alto Tietê de abastecimento de água / Isabela Aline Fernandes Costa. -- Diadema, 2019.

63 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Paulo - Campus Diadema, 2019.

Orientador: Prof. Dr. Werner Siegfried Hanisch

1. Abastecimento de água. 2. Gosto e odor. 3. MIB e geosmina. I. Título.

CDD 628.16

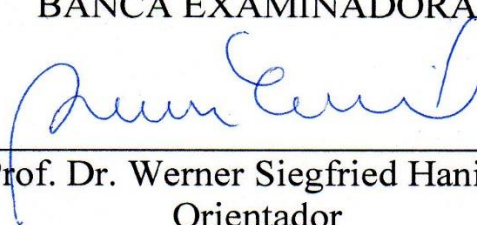
ISABELA ALINE FERNANDES COSTA

**ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS
AMBIENTAIS E OS COMPOSTOS GEOSMINA E 2-
METILISOBORNEOL NO RESERVATÓRIO JUNDIAÍ DO
SISTEMA ALTO TIETÊ DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

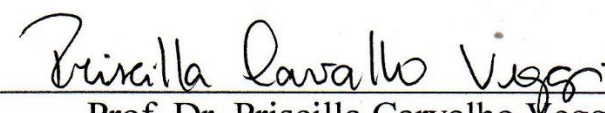
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como exigência parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química, ao Instituto de
Ciências Ambientais, Químicas e
Farmacêuticas da Universidade Federal
de São Paulo – Campus Diadema.

Aprovado em: 18/11/2019

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Werner Siegfried Hanisch
Orientador



Prof. Dr. Priscilla Carvalho Veggi



Prof. Dr. Fabiana Perrechil Bonsanto

Diadema (SP)
2019

“Cada vez que você faz uma opção está transformando sua essência em alguma coisa um pouco diferente do que era antes.”

(C. S. Lewis)

RESUMO

Nos últimos anos, a presença de compostos que causam gosto e odor em águas para abastecimento público tem chamado a atenção de diversos pesquisadores no mundo todo. Dentre esses compostos, os principais são a geosmina e o 2-metilisoborneol (MIB), que conferem à água gosto e odor de terra e mofo, sendo perceptíveis pelos consumidores a níveis muito baixos. Como esses compostos são resistentes ao tratamento convencional em estações de tratamento de água, faz-se necessário o estudo deste fenômeno a fim de prever a ocorrência destes compostos. Neste trabalho foram analisados diversos parâmetros ambientais monitorados pela SABESP no reservatório eutrófico Jundiaí, que abastece vários municípios da Região Metropolitana de São Paulo. A partir do uso de Análise de Componentes Principais, observou-se que devido à grande quantidade de nutrientes no meio, os principais fatores que influenciam a produção e a liberação desses compostos na água são as cianobactérias, especialmente a *Dolichospermum* (produtora de geosmina) e a *Pseudanabaena* (produtora de MIB). Entretanto, observa-se que existe uma relação complexa de competição e interação entre os microrganismos presentes, o que sugere também que outras cianobactérias influenciam o aparecimento desses compostos na água. Os fatores abióticos não exerceram influência significativa nas concentrações de MIB e de geosmina, com exceção da clorofila-A, oxigênio dissolvido e cor aparente, que influenciaram de forma levemente moderada a concentração dessas substâncias.

Palavras-chave: Abastecimento de água; gosto e odor; MIB e geosmina

ABSTRACT

In the last years, the presence of taste and odor compounds in water for public supply has caught the attention of many researchers around the world. Among these compounds, the main ones are geosmin and 2-methylisoborneol (MIB), which give the water an earthy and moldy taste and odor, being noticeable by consumers at very low levels. As these compounds are resistant to conventional treatment in water treatment plants, it is necessary to study these events in order to predict the occurrence of these compounds. This study analyzed several environmental parameters monitored by SABESP in the Jundiaí eutrophic Reservoir, which supplies several municipalities of the São Paulo Metropolitan Region. Using Principal Component Analysis, it was observed that due to the large amount of nutrients in the environment, the main factors influencing the production and release of these compounds in water are cyanobacteria, especially *Dolichospermum* (geosmine producer) and *Pseudanabaena* (MIB producer). However, it is clear that there is a complex relationship of competition and interaction between the microorganisms present, which also suggests that other cyanobacteria are influencing the appearance of these compounds in water. Abiotic factors had no significant influence on MIB and geosmine concentrations, except for chlorophyll-A, dissolved oxygen and apparent color, which slightly influenced the concentration of these substances.

Keywords: water supply; taste and odor; MIB and geosmine

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura molecular da geosmina (GEO) e do MIB.	14
Figura 2 – Principais origens dos compostos que causam gosto e odor em ambientes aquáticos.	16
Figura 3 – Sistema Alto Tietê de abastecimento de água.	31
Figura 4 – Média do IQA nos últimos cinco anos nos reservatórios do sistema Alto Tietê.	32
Figura 5 – Média do IAP dos últimos cinco anos nos reservatórios Jundiaí e Taiaçupeba.	32
Figura 6 – Monitoramento das concentrações de fósforo total e clorofila-a pela CETESB no reservatório Jundiaí nos anos de 2012 a 2017.	33
Figura 7 – Monitoramento de fitoplâncton pela CETESB no reservatório Jundiaí nos anos de 2012 a 2017.	34
Figura 8 – Quantificação das células de cianobactérias pela CETESB no reservatório Jundiaí nos anos de 2012 a 2017.	34
Figura 9 – Pontos de monitoramento da SABESP no Sistema Alto Tietê.	35
Figura 10 – Média Anual do IET global para o reservatório Jundiaí.	40
Figura 11 – Análise de Componentes Principais com as substâncias que causam gosto e odor e cada classificação de parâmetro. a Cianobactérias. b Eutrofização. c Metais. d Luz. e Climático. f Algicidas.	44
Figura 12 – Análise de Componentes Principais com as substâncias que causam gosto e odor e todas as cianobactérias monitoradas.	46
Figura 13 – Variâncias totais para os componentes principais determinados. a Variâncias totais para a ACP das cianobactérias presentes neste trabalho. b Variâncias totais para a ACP dos fatores de eutrofização. c Variâncias totais para a ACP dos metais. d Variâncias totais para a ACP dos fatores de luz. e Variâncias totais para a ACP dos fatores climáticos. f Variâncias totais para a ACP dos algicidas.	47
Figura 14 – Variâncias totais para a Análise de Componentes Principais das substâncias que causam gosto e odor e todas as cianobactérias monitoradas.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação segundo o índice de estado trófico modificado por Lamparelli (2004).	17
Tabela 2 – Microrganismos produtores de MIB e Geosmina.	18
Tabela 3 – Cianobactérias produtoras de MIB e Geosmina.	19
Tabela 4 – Parâmetros físicos, químicos e biológicos monitorados na represa Jundiaí.	36
Tabela 5 – Microrganismos monitorados no reservatório Jundiaí.	37
Tabela 6 – Média Mensal do IET global para o reservatório Jundiaí.	39
Tabela 7 – Matriz de Correlação das classificações Cianobactérias e Eutrofização.	48
Tabela 8 – Matriz de Correlação das classificações Metais e Luz.	49
Tabela 9 – Matriz de Correlação das classificações Climático e Algicida.	50
Tabela 10 – Matriz de Correlação de todas as cianobactérias.	51
Tabela 11 – Tabela de fatores das classificações Cianobactérias e Eutrofização.	51
Tabela 12 – Tabela de fatores das classificações Metais e Luz.	52
Tabela 13 – Tabela de fatores para as classificações Climático e Algicida.	53
Tabela 14 – Tabela de fatores para todas as cianobactérias.	54
Tabela 15 – Regressão Multilinear para cada substância que causa gosto e odor no reservatório Jundiaí.	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACP	Análise de Componentes Principais
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETA	Estação de Tratamento de Água
GEO	Geosmina
IAP	Índice de Qualidade da Água para fins de Abastecimento Público
IQA	Índice de Qualidade das Águas
ISTO	Índice de Substâncias Tóxicas e Organolépticas
MIB	2-Metilisoborneol
PMC	Perceptron Multicamadas
POA	Processo Oxidativo Avançado
RML	Regressão Multilinear
RNA	Redes Neurais Artificiais
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SOM	Mapa Auto Organizável
SPAT	Sistema Produtor do Alto Tietê
TN:TP	Razão Nitrogênio Total e Fósforo Total

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 GOSTO E ODOR EM AMBIENTES AQUÁTICOS	13
3.1.1 Substâncias que causam gosto e odor na água	13
3.1.2 Eutrofização em Ambientes Aquáticos.....	15
3.2 PRODUTORES DE MIB E GEOSMINA	18
3.3 FATORES QUE INFLUENCIAM AS CONCENTRAÇÕES DE MIB E GEOSMINA	21
3.4 MODELAGEM MATEMÁTICA.....	26
3.5 O RESERVATÓRIO JUNDIAÍ	29
4. MÉTODOS.....	35
4.1 ÁREA DE ESTUDO.....	35
4.2 DADOS COLETADOS	35
4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1 ÍNDICE DE EUTROFIZAÇÃO NO RESERVATÓRIO JUNDIAÍ.....	39
5.2 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAS E REGRESSÃO MULTILINEAR 40	
6. CONCLUSÃO.....	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1. INTRODUÇÃO

As condições da água potável são definidas tanto por parâmetros biológicos e físico-químicos, quanto por parâmetros estéticos relacionados a gosto, cor e odor. O ser humano geralmente associa esses padrões estéticos com a segurança e potabilidade da água para o seu consumo. Nas últimas décadas, a ocorrência de eventos de gosto e odor na água potável e em alimentos tem levado os consumidores a questionarem a segurança dos produtos que ingerem. Consequentemente, as companhias de saneamento e indústrias de aquicultura vem sofrendo com reclamações de clientes frequentemente (SRINIVASAN e SORIAL, 2011; HATHURUSINGHA e DAVEY, 2014; WANG et al., 2015a; DOEDERER et al., 2019; XUWEI et al., 2019).

Os compostos mais comumente identificados em águas de abastecimento são os metabólitos produzidos por vários microrganismos: o 2-metilisoborneol (MIB) e a geosmina, que conferem gosto de mofo e terra à água, respectivamente (DOEDERER et al., 2019). Apesar de não oferecerem riscos à saúde humana, é necessário realizar o controle dessas substâncias, já que são perceptíveis pelos consumidores em baixas concentrações (ANTONOPOULOU et al., 2014; WATSON et al., 2016).

MIB e geosmina são sintetizados e liberados por diversos microrganismos, entre eles cianobactérias, actinomicetos, fungos e protozoários. Entretanto, os produtores mais importantes dessas substâncias são as cianobactérias (WATSON et al., 2016). O aumento da proliferação (ou floração) desses microrganismos tem se tornado um problema global e geralmente ocorre devido ao excesso de nutrientes em rios e reservatórios decorrente do crescimento exagerado da urbanização (ZAMYADI et al., 2015; XUWEI et al., 2019; XU et al., 2019).

A remoção de gosto e odor em águas de abastecimento é uma tarefa complicada, pois MIB e geosmina são persistentes ao tratamento convencional de água, que consiste em coagulação, sedimentação e filtração (SRINIVASAN e SORIAL, 2011; ANTONOPOULOU et al., 2014; MA et al., 2018). Além disso, devido à resistência desses compostos à oxidação, alguns oxidantes utilizados nas estações

de tratamento (como cloro ou permanganato de potássio) são pouco eficientes (LEE et al., 2017). Atualmente, processos com ozônio e carvão ativado são os métodos mais utilizados; porém são caros e nem sempre removem completamente esses compostos (PERKINS et al., 2019).

Sendo assim, é mais vantajoso que as indústrias consigam identificar as principais causas dos eventos de gosto e odor para atenuar esses episódios a partir de sua origem (WANG et al., 2015a). Por conta disso, é importante entender não apenas as características dessas substâncias, mas também sua relação com os diversos fatores ambientais (XUWEI et al., 2019).

O desenvolvimento de modelos preditivos é importante para determinar quando esses eventos de MIB e geosmina estão na iminência de ocorrer, o que possibilita que as estações de tratamento iniciem o gerenciamento do problema antes que surjam reclamações de clientes, otimizando o tratamento da água para abastecimento e minimizando os custos com esses processos (DZIALOWSKI et al., 2009; KEHOE et al., 2015). Para isso, pode-se realizar o monitoramento contínuo dessas substâncias e dos parâmetros bióticos e abióticos que influenciam sua liberação no meio (DZIALOWSKI et al., 2009).

Entretanto, a modelagem desses compostos se torna complicada, como demonstrado por alguns autores (DZIALOWSKI et al., 2009; KEHOE et al., 2015; BERTONE e HALLORAN, 2016), devido às incertezas sobre as origens e influência de vários parâmetros na produção de 2-metilisoborneol e geosmina (PERKINS et al., 2019). Dentre esses parâmetros, pode-se citar nutrientes, quantidade de cianobactérias (OLSEN et al., 2017), luz, temperatura (ALGHANMI et al., 2018) e micronutrientes (PARINET et al., 2010). Com este trabalho, pretende-se avaliar os principais efeitos dessas variáveis no comportamento dessas substâncias, além das modelagens matemáticas utilizadas para se prever esses acontecimentos de gosto e odor em águas de abastecimento público.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho consiste em analisar os diversos fatores ambientais (físico-químicos, biológicos e climáticos) da água do reservatório Jundiá e identificar os principais parâmetros que influenciam a concentração dos compostos 2-metilisoborneol (MIB) e geosmina neste reservatório utilizado para o abastecimento público.

Para o entendimento dessa influência, serão utilizados métodos estatísticos de Análise de Componentes Principais, matriz de correlação de Pearson e regressão multilinear, comparando esses resultados com a revisão da literatura.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 GOSTO E ODOR EM AMBIENTES AQUÁTICOS

3.1.1 Substâncias que causam gosto e odor na água

A água é um componente essencial para a manutenção da vida na Terra. O crescimento da urbanização, da agricultura, da industrialização e o aumento no consumo de água afetam sua qualidade na natureza. Sendo assim, ressalta-se a importância da conservação e do gerenciamento da água, para que se faça um uso sustentável deste recurso natural (LEE et al., 2017), a fim de garantir sua utilização às futuras gerações.

O ser humano normalmente avalia a qualidade da água e do alimento que ingere com base em parâmetros sensoriais, como gosto, odor e cor. Consequentemente, qualquer mudança nestes parâmetros causa preocupação pública e desconfiança nos consumidores, já que eles relacionam essas características desagradáveis com riscos à saúde (WATSON et al., 2016).

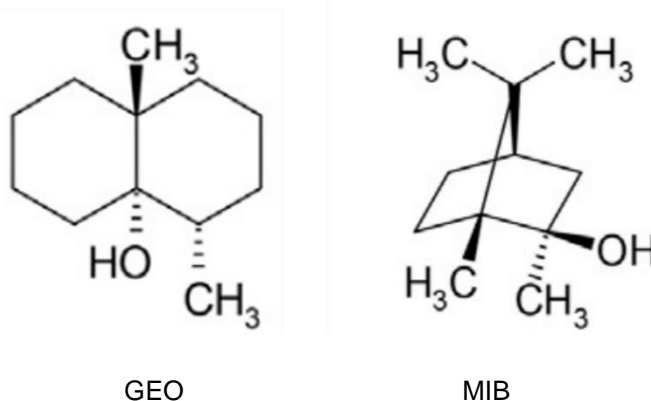
Compostos que causam gosto e odor desagradáveis podem afetar reservatórios de água potável (SU et al., 2019), lagos (XUWEI et al., 2019), frutas e vegetais (LIATO e AÍDER, 2017), além de peixes (HATHURUSINGHA e DAVEY, 2014, 2016). Embora não ofereçam riscos à saúde, eles frequentemente induzem reclamações dos consumidores de água potável (SRINIVASAN e SORIAL, 2011; LI et al., 2018). Além disso, impactam negativamente a comerciabilidade dos produtos de aquicultura, prejudicando a reputação dos produtos e a confiança dos consumidores (OLSEN et al., 2016).

De acordo com Parinet et al. (2010) e Watson et al. (2016), a presença dessas características desagradáveis contribuem para a substituição gradual da água de torneira por água engarrafada, gerando maiores gastos aos consumidores e grandes problemas ambientais relacionados ao aumento do uso de plásticos. Sendo assim, as

concessionárias públicas e privadas de tratamento de água precisam entender melhor esse fenômeno para conseguir fornecer uma resposta mais rápida aos consumidores.

Entre esses compostos, os mais comumente encontrados em rios, lagos e reservatórios são o MIB (2-metilisoborneol) e a geosmina (trans-1,10-dimetil-trans-9-decalol), que conferem à água gosto de mofo e de terra, respectivamente (LIU et al., 2016; WATSON et al., 2016). Eles consistem em álcoois terciários (Figura 1) atóxicos e semi-voláteis provenientes do metabolismo e biodegradação de diversos microrganismos, principalmente cianobactérias (ANTONOPOULOU et al., 2014; KIM et al., 2016). Os seres humanos são capazes de detectar essas substâncias a níveis extremamente baixos, já que eles possuem um limiar de odor de aproximadamente 10 ngL^{-1} (COOK et al., 2001). Apesar de estarem mais frequentemente relacionados com sistemas eutróficos, essas substâncias estão presentes em uma grande variedade de ambientes lânticos e lóticos que abrangem diversas características físicas, químicas e biológicas (WATSON et al., 2016). Há relatos da ocorrência desses compostos em várias partes do mundo, como Estados Unidos (GRAHAM et al., 2010), China (XUWEI et al., 2019), Coreia (CHUNG et al., 2016), Austrália (DOEDERER et al., 2019), Japão (NIYAMA et al., 2016), Alemanha (JÄHNICHEN et al., 2011) e Reino Unido (PERKINS et al., 2019), além do Brasil.

Figura 1 – Estrutura molecular da geosmina (GEO) e do MIB.



Fonte: Suurnäkki et al. (2015)

Justamente por eles não oferecerem riscos à saúde, muitos países (inclusive o Brasil) não possuem um regulamento estabelecendo a quantidade máxima permitida para esses compostos. Entretanto, em alguns países existem diretrizes ou normas para garantir a qualidade da água potável, que estabelecem concentrações máximas de MIB e geosmina de 20 ngL^{-1} na Coreia do Sul e 10 ngL^{-1} na China e Japão (PARK et al., 2017).

Apesar do conhecimento adquirido desde que foram descobertos no início dos anos 1960, esses dois metabólitos ainda não são muito compreendidos, o que implica em empecilhos para se prever, controlar e tratar essas substâncias (JÜTTNER e WATSON, 2007).

Como estes compostos possuem um limite de detecção muito baixo e não podem ser removidos de maneira satisfatória por meio do tratamento de água convencional (que inclui coagulação, floculação, sedimentação, filtração e cloração), a remoção de MIB e geosmina da água potável é uma tarefa bastante importante e desafiadora (SRINIVASAN e SORIAL, 2011; ANTONOPOULOU et al., 2014; MA et al., 2018; YUAN et al., 2018).

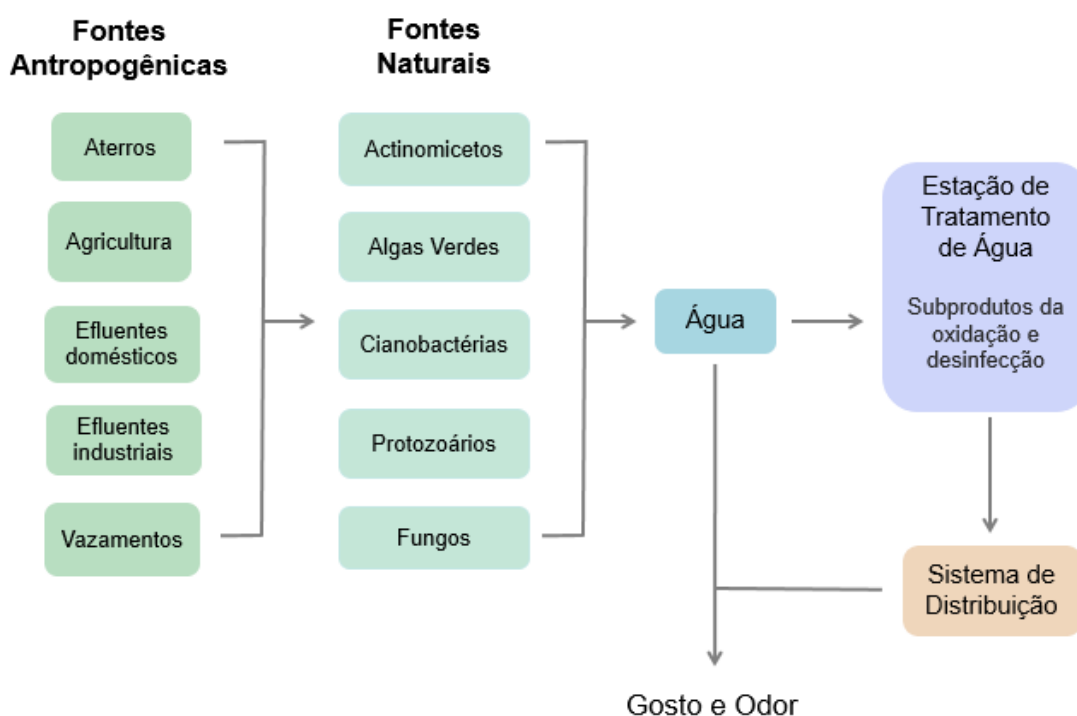
Sendo assim, o desenvolvimento de modelos preditivos proporciona uma abordagem mais econômica e prática para o controle dessas substâncias (PARINET et al., 2013), como será abordado na Seção 3.4. Tais ferramentas podem permitir que gestores e operadores das estações de tratamento iniciem o tratamento da água antes que surjam reclamações dos clientes (DZIALOWSKI et al., 2009).

3.1.2 Eutrofização em Ambientes Aquáticos

Essas substâncias são provenientes de diversas fontes, como é mostrado na Figura 2. Entretanto, uma das origens mais comuns é a eutrofização de lagos e reservatórios decorrente de ações antropológicas, como agricultura ou despejo de efluentes. Isso ocorre porque o excesso de nutrientes na água promove a proliferação de vários microrganismos, entre eles as cianobactérias e os actinomicetos, ambos

produtores de MIB e geosmina. Também existe a possibilidade de surgimento e crescimento de algas em canais suprimindo água para as estações de tratamento e até mesmo nas próprias estações de tratamento, em locais abertos à atmosfera, como tanques de sedimentação e coagulação (SRINIVASAN e SORIAL, 2011; ANTONOPOULOU et al., 2014).

Figura 2 – Principais origens dos compostos que causam gosto e odor em ambientes aquáticos.



Fonte: Elaboração do autor com base em Antonopoulou e Konstantinou (2017).

Uma maneira de se avaliar o estado trófico de um ambiente aquático consiste no cálculo do Índice de Estado Trófico (IET), que representa a capacidade global de corpos d'água de dobrar a biomassa de algas. Lamparelli (2004) propôs as Equações (1), (2) e (3) para o cálculo do IET para fósforo total (P Tot), Clorofila-A (Clorof A) e o IET global, respectivamente (BASILIO e BARROS, 2014).

$$\text{IET (P Tot)} = 10 \left(6 - \left(1,77 - \left(\frac{0,42 \ln(\text{P Tot})}{\ln 2} \right) \right) \right) \quad (1)$$

$$\text{IET (Clorof A)} = 10 \left(6 - \left(0,92 - \left(\frac{0,34 \ln(\text{Clorof A})}{\ln 2} \right) \right) \right) \quad (2)$$

$$\text{IET} = \frac{\text{IET (P Tot)} + \text{IET (Clorof A)}}{2} \quad (3)$$

Em que:

P Tot = fósforo total (μgL^{-1});

Clorof A = Clorofila-A (μgL^{-1}).

A Tabela 1 apresenta a relação entre o valor numérico do IET e o Estado Trófico do ambiente aquático analisado. Ressalta-se que a classificação de estado trófico varia de ultraoligotrófico (baixos valores de IET: possuem pouca oferta de nutrientes) a hipereutrófico (altos valores de IET: possuem alta oferta de nutrientes).

Tabela 1 – Classificação segundo o índice de estado trófico modificado por Lamparelli (2004).

Categoria Estado Trófico	IET
Ultraoligotrófico	$\text{IET} \leq 47$
Oligotrófico	$47 < \text{IET} \leq 52$
Mesotrófico	$52 < \text{IET} \leq 59$
Eutrófico	$59 < \text{IET} \leq 63$
Supereutrófico	$63 < \text{IET} \leq 67$
Hipereutrófico	$\text{IET} > 67$

Adaptado de Basilio e Barros (2014).

3.2 PRODUTORES DE MIB E GEOSMINA

MIB e geosmina podem ser produzidos por vários organismos, sendo que vários habitats são suscetíveis ao desenvolvimento desses compostos, como solos, sedimentos e biofilmes (PARINET et al., 2010). Esses microrganismos são bênticos, pelágicos e terrestres (JÜTTNER e WATSON, 2007), como por exemplo fungos (LARSEN e FRISVAD, 1995; BREHERET et al., 1999), protozoários (HAYES et al., 1991) e actinomicetos (DIONIGI et al., 1996; KUTOVAYA e WATSON, 2014; ASQUITH et al., 2018). A Tabela 2 apresenta os principais gêneros desses microrganismos e a substância que cada um produz, com exceção das cianobactérias.

Tabela 2 – Microrganismos produtores de MIB e Geosmina.

Classificação	Organismo	Substância	Referência
Actinomicetos	<i>Actinomyces</i>	GEO	(KUTOVAYA e WATSON, 2014)
	<i>Streptomyces</i>	MIB/GEO	(SCHRADER e BLEVINS, 1993; DIONIGI et al., 1996; SCHRADER e BLEVINS, 2001; ASQUITH et al., 2018)
Fungos	<i>Cortinarius</i>	GEO	(BREHERET et al., 1999)
	<i>Cystoderma</i>	GEO	(BREHERET et al., 1999)
	<i>Penicillium</i>	MIB/GEO	(LARSEN e FRISVAD, 1995; WERT et al., 2014)
Protozoários	<i>Vanella</i>	GEO	(HAYES et al., 1991)

Entretanto, as cianobactérias são consideradas os produtores mais importantes desses compostos (WATSON et al., 2016), incluindo vários gêneros que estão tipicamente associados com os eventos de florações de cianobactérias, tais como *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Lyngbya*, *Oscillatoria*, *Phormidium*, *Planktothrix* e

Pseudanabaena (LI et al., 2012; ZHANG et al., 2014; SUURNÄKKI et al., 2015; XU et al., 2019). A Tabela 3 apresenta os principais gêneros das cianobactérias e a substância que cada um produz.

Tabela 3 – Cianobactérias produtoras de MIB e Geosmina.

Organismo	Substância	Referência
<i>Anabaena</i>	GEO	(IZAGUIRRE e TAYLOR, 2007; HO et al., 2012; LI et al., 2012; SU et al., 2013; TSAO et al., 2014; BERTONE e O'HALLORAN, 2016; WANG e LI, 2015)
<i>Aphanizomenon</i>	GEO	(KUTOVAYA e WATSON, 2014; SUURNÄKKI et al., 2015)
<i>Leptolyngbya</i>	MIB/GEO	(WANG et al., 2015b)
<i>Lyngbya</i>	GEO	(WERT et al., 2014; ZHANG et al., 2014; KUTOVAYA e WATSON, 2014)
<i>Microcoleus</i>	MIB	(ALGHANMI et al., 2018)
<i>Microcystis</i>	GEO	(BERTONE e O'HALLORAN, 2016)
<i>Nostoc</i>	MIB/GEO	(SUURNÄKKI et al., 2015)
<i>Oscillatoria</i>	MIB/GEO	(SCHRADER et al., 2003; IZAGUIRRE e TAYLOR, 2007; WERT et al., 2014; SUURNÄKKI et al., 2015)
<i>Phormidium</i>	MIB/GEO	(IZAGUIRRE e TAYLOR, 2007; LI et al., 2012; SUN et al., 2013; KUTOVAYA e WATSON, 2014; ALGHANMI et al., 2018)
<i>Planktothrix</i>	MIB/GEO	(KUTOVAYA e WATSON, 2014; SU et al., 2015; SUURNÄKKI et al., 2015)
<i>Pseudanabaena</i>	MIB	(IZAGUIRRE e TAYLOR, 1998; KUTOVAYA e WATSON, 2014; WANG e LI, 2015; LI et al., 2018; HUANG et al., 2018; XU et al., 2019)

Tabela 3 – Cianobactérias produtoras de MIB e Geosmina.

Organismo	Substância	Referência
<i>Synechococcus</i>	MIB	(KUTOVAYA e WATSON, 2014)

Esses microrganismos sintetizam MIB e geosmina provavelmente durante seu crescimento e então liberam essas substâncias dependendo da fase de seu desenvolvimento ou de fatores ambientais. Grande parte do MIB e da geosmina é liberada durante a morte ou biodegradação das células das cianobactérias (SRINIVASAN e SORIAL, 2011).

Alguns estudos encontraram correlações significativas entre diatomáceas, especialmente a *Synedra*, e a produção de MIB e geosmina (SUGIURA et al., 1998, 2004; SCHRADER et al., 2011; OLSEN et al., 2016, 2017). Apesar de aparentemente não possuírem a capacidade de produzir esses compostos (SUGIURA et al., 2004), diatomáceas são utilizadas como substrato e fonte de carbono para o crescimento de um actinomiceto produtor de MIB e geosmina, o *Streptomyces* (SUGIURA et al., 1998). Mais recentemente, Olsen et al. (2016) encontraram uma correlação mais forte entre o MIB e o biovolume de diatomáceas ($R^2 = 0,65$) do que entre o MIB e o biovolume de cianobactérias ($R^2 = 0,48$), chegando a uma conclusão semelhante à de Sugiura et al. (2004).

Isso mostra que ainda há incerteza com relação aos organismos que produzem essas substâncias, já que durante um evento de gosto e odor na água existem espécies diferentes que interagem entre si, formando um padrão de comportamento bastante complexo que também é afetado pela oferta de nutrientes e pelos parâmetros físico-químicos do local (BERTONE e O'HALLORAN, 2016). Apesar de alguns estudos apresentarem análises específicas em relação às espécies capazes de produzir esses compostos (WOOD et al., 2001; JÜTTNER e WATSON, 2007; WATSON et al., 2016), ressalta-se a necessidade de compreender mais detalhadamente a relação existente entre diatomáceas, actinomicetos, cianobactérias e a produção de MIB e geosmina.

3.3 FATORES QUE INFLUENCIAM AS CONCENTRAÇÕES DE MIB E GEOSMINA

Olsen et al. (2016) conduziram um experimento no qual manipularam as concentrações dos nutrientes nitrogênio e fósforo em um reservatório mesotrófico dos Estados Unidos, a fim de verificar sua influência na comunidade de fitoplâncton e na produção de 2-metilisoborneol. Os autores perceberam que a adição de um único nutriente, nitrogênio ou fósforo, não teve efeito na produção desse composto. Entretanto, a concentração de MIB aumentou quando ambos nutrientes foram adicionados ao sistema, o que é uma informação valiosa aos gestores dos recursos hídricos dado o potencial efeito da eutrofização na água potável. Tanto o biovolume de cianobactérias quanto o de diatomáceas aumentou significativamente quando ambos nutrientes foram adicionados. O maior preditor de MIB aparenta ser a adição de ambos nitrogênio e fósforo, já que as maiores concentrações dessa substância foram obtidas em tratamentos com baixa razão entre Nitrogênio Total e Fósforo Total (TN:TP). Sendo assim, os autores sugeriram que ferramentas para monitorar e diminuir a quantidade desses nutrientes nos reservatórios são importantes para se fazer o controle de substâncias odorantes.

Olsen et al. (2017) conduziram um experimento no qual manipularam dois fatores: nutrientes e mistura vertical da água do reservatório (que estimulam o crescimento de cianobactérias e diatomáceas, respectivamente). No geral, a concentração de geosmina foi afetada apenas pela adição de nutrientes (nitrogênio e fósforo) e estava relacionada positivamente apenas com a biomassa de cianobactérias, enquanto que a concentração de MIB aumentou no tratamento com nutrientes e mistura vertical e também estava relacionada com as cianobactérias. Esses compostos mostraram uma relação inversa com o passar do tempo, já que a geosmina aumentou logo no começo do experimento e depois decresceu e o MIB aumentou apenas na última semana do experimento, praticamente ao mesmo tempo em que houve aumento do biovolume de diatomáceas. Uma possível explicação para tal fato pode estar relacionada com os outros organismos produtores dessas substâncias, como actinomicetos. De acordo com Sugiura et al. (1998), esses

organismos utilizam diatomáceas e cianobactérias como substrato, o que pode explicar a relação inversa dessas substâncias.

Bertone e O'Halloran (2016) mostraram que a concentração de geosmina está relacionada positivamente com a quantidade total de nitrogênio, ferro, temperatura da água e turbidez e relacionada negativamente com o volume do reservatório. Entretanto, parâmetros como oxigênio dissolvido (OD) e fósforo total mostraram uma correlação bem fraca com os eventos de geosmina. No estudo que realizaram, os autores notaram florações de cianobactérias que não levaram à produção de geosmina. Isso pode ser explicado pelo fato de que não detectaram a presença de *Microcystis* ou *Dolichospermum* e sim de *Merismopedia*, que não é conhecida por ter a capacidade de produzir esse composto. Dessa forma, conclui-se que a espécie de cianobactéria predominante é um fator mais importante que o biovolume total de cianobactérias para prever os eventos de geosmina.

Dzialowski et al. (2009) analisaram os eventos de gosto e odor causados pela geosmina em cinco reservatórios dos Estados Unidos. Os autores constataram que o biovolume de cianobactérias e a clorofila-a não foram bons preditores da concentração de geosmina, já que esse composto estava negativamente relacionado com esses parâmetros. Outros autores relataram que havia uma relação positiva entre a geosmina e esses microorganismos, como Sugiura et al. (2004) e Jüttner e Watson (2007). Porém, para melhores resultados, deve-se analisar tanto a fração particulada quanto a dissolvida desses compostos. Dessa forma, é possível estabelecer com mais precisão a relação existente entre essas substâncias e os seus produtores (JÜTTNER e WATSON, 2007). Além disso, a análise apenas do estado trófico do lago não garante boa previsão de geosmina, já que a maior concentração dessa substância foi observada no reservatório que tinha baixas concentrações de nutrientes e de clorofila-a (lago oligotrófico). Também observaram geosmina presente nos reservatórios durante o inverno, o que mostra que a produção deste composto não ocorre apenas em meses com temperaturas mais altas. Por fim, os autores concluíram que o fósforo é um fator limitante muito importante para a produção e liberação de geosmina no meio aquático.

Parinet et al. (2010) estudaram a influência de 39 parâmetros da qualidade da água na produção de MIB e geosmina em 3 rios diferentes no Canadá. Os autores observaram maiores concentrações destes compostos no rio localizado na área mais afetada por influências antropogênicas (primordialmente, urbanização e agricultura). Além disso, constaram forte correlação de MIB e geosmina com manganês e potássio. Em relação ao MIB, sua presença foi observada também no inverno, o que sugere que os processos que dão origem a esses dois compostos podem ser diferentes. Também não encontraram uma relação significativa entre cianobactérias e esses compostos. Tal fato pode sugerir uma origem externa desses compostos, já que parte deles pode ter sido produzida por outros microrganismos terrestres (actinomicetos e fungos, por exemplo) e, então, transportada pela água da chuva ou pela lixiviação do solo até os rios, onde essas substâncias foram encontradas. Sendo assim, a presença de geosmina pode ser explicada por um processo associado principalmente com a eutrofização da água e, em menor grau, por uma origem alóctone. Entretanto, a presença de MIB pode estar relacionada a dois processos diferentes: uma origem invernal (provavelmente alóctone) envolvendo contribuições antropogênicas e uma origem bacteriana autóctone (PARINET et al., 2010).

Parinet et al. (2013) mostraram que os seguintes parâmetros afetam positivamente a produção de geosmina: feofetina, potássio, biovolume total de algas verdes, clorofila-a, bactérias atípicas, bactérias heterotróficas, total de diatomáceas e nitrogênio; que em sua maioria são parâmetros relacionados com o processo de eutrofização. Entretanto, o papel da clorofila-a no comportamento da geosmina é controverso, já que alguns autores observaram relação positiva, enquanto que outros, negativa (DZIALOWSKI et al., 2009; SAADOUN et al., 2001). É interessante perceber que não foram encontradas relações significativas entre o biovolume de cianobactérias e a geosmina. Isso pode indicar uma origem alóctone (ou externa) desses compostos, já que eles podem ter sido produzidos por bactérias presentes na água ou por outros microrganismos do solo. Os autores também demonstraram que o potencial redox (E), relacionado com o oxigênio dissolvido da água, se relaciona negativamente com a geosmina. Ou seja, durante períodos de eutrofização, o oxigênio dissolvido na água cai (assim como o valor de E) e a concentração de geosmina aumenta.

Su et al. (2015) relataram a ocorrência de eventos esporádicos de MIB em um grande reservatório que abastece Pequim, na China. Os autores identificaram que a cianobactéria *Planktothrix*, produtora de MIB, era abundante nas camadas mais profundas de reservatórios rasos, já que nessas regiões existem maiores concentrações de nutrientes (nitrogênio e fósforo). Esse gênero de cianobactérias aumenta quando a densidade de *Microcystis* decai, permitindo que a luz penetre até a superfície dos sedimentos. Sendo assim, os autores sugeriram que o aumento do nível do reservatório pode ser uma solução para evitar o crescimento de *Planktothrix* e a possível produção de MIB por este gênero.

Tsao et al. (2014) monitoraram a produção de geosmina pela cianobactéria *Anabaena* em um reservatório da Austrália. Os autores concluíram que um ambiente com pouca intensidade de luz promove a produção de geosmina, já que a quantidade dessa substância nas células coletadas em maiores profundidades (20 metros) foi maior do que nas células coletadas na superfície. Entretanto, a quantidade total de geosmina encontrada foi maior na superfície devido à maior biomassa de cianobactérias. Isso sugere que a quantidade de células é um fator importante para estimar a quantidade dessa substância em um lago ou reservatório.

Perkins et al. (2019) estudaram a distribuição de MIB e geosmina em seis reservatórios no Reino Unido, que englobam ambientes cujos níveis tróficos variam desde mesotróficos até hipereutróficos. Os autores observaram que as concentrações de MIB e geosmina eram maiores quando havia diminuição do nitrogênio total ou aumento do fósforo total (razões TN:TP mais baixas). As variações dessa razão de nutrientes ocorreram devido à diminuição do nitrato presente no meio aquático, provavelmente por conta da desnitrificação ou absorção biológica realizada pelos microrganismos. Por meio da análise de Mapas Auto Organizáveis (Self-Organizing Maps – SOMs), foi constatado que a concentração desses compostos estava relacionada positivamente com o biovolume de cianobactérias, clorofila-a e pH. Já que encontraram uma relação fortemente positiva entre esses compostos e a concentração de amônio, a hipótese criada foi que o amônio estimula a produtividade das cianobactérias, o que consequentemente aumenta a produção de MIB e geosmina por esses organismos. Portanto, os autores concluíram que o amônio é um parâmetro

importante a ser monitorado e deve-se criar medidas para reduzir sua concentração nos reservatórios. Dessa forma, é possível evitar o aumento da produtividade das cianobactérias que estão associadas aos eventos de gosto e odor da água potável.

Os estudos conduzidos por Alghanmi et al. (2018) não detectaram correlações entre luz e temperatura com a produção de MIB e geosmina. Entretanto, os autores concluíram que a produção dessas substâncias estava relacionada a valores ótimos destes parâmetros. Basicamente, encontraram as maiores concentrações de MIB e geosmina a 25 °C e 17 μmol fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Wang et al. (2015a) estudaram a ocorrência de eventos de gosto e odor em um reservatório de água potável na China durante o inverno. Esse reservatório ficava coberto por uma camada de gelo durante esta época do ano e, apesar das baixas temperaturas da água (de 1 a 2 °C), o desenvolvimento das cianobactérias foi possível devido à baixa turbidez e à grande oferta de nutrientes. Portanto, os autores concluíram que o fator mais relevante que influencia a produção e liberação de MIB e geosmina por esses microrganismos é a eutrofização do meio aquático, ao invés da temperatura da água.

Wang e Li. (2015) analisaram a produção de geosmina por *Anabaena* e MIB por *Pseudanabaena*, concluindo que estes compostos estão relacionados negativamente com a clorofila-a.

Saadoun et al. (2001) investigaram a influência de alguns parâmetros ambientais na produção de geosmina por *Anabaena*, em um reservatório de água potável nos Estados Unidos. Os autores não encontraram relações significativas entre geosmina, luz e temperatura. Entretanto, concluíram que essa substância estava relacionada positivamente com a concentração de amônio e de fósforo e relacionada negativamente com clorofila-a e com a concentração de nitrato (baixa razão TN:TP).

Sugiura et al. (2004) estudaram a relação de vários parâmetros com os eventos de gosto e odor em um lago eutrófico no Japão. Utilizando redes neurais artificiais, os autores demonstraram que o MIB tem uma relação positiva com a DQO e negativa com a temperatura da água e ácido silícico. Por sua vez, a geosmina se relaciona

positivamente com a DQO e com o OD e negativamente com a quantidade de fósforo total.

Kehoe et al. (2015) estudaram eventos de gosto e odor em um reservatório no Canadá e mostraram que o parâmetro menos importante para prever as concentrações desses compostos no geral foi a clorofila-a, enquanto que as concentrações de *Anabaena*, *Oscillatoria* e *Aphanizomenon* foram preditoras importantes de eventos de gosto e odor. Eles concluíram que o monitoramento da comunidade microbótica, apesar de trabalhoso, pode fornecer dados importantes para se realizar o gerenciamento de reservatórios de abastecimento água potável.

Observa-se que a determinação de cianobactérias não é o único fator preponderante para se prever os eventos de geosmina. Deve-se levar em conta também outros fatores que estão relacionados com a complexidade do sistema, como por exemplo nitrogênio, temperatura, variações no nível do reservatório, entre outros parâmetros particulares (BERTONE e O'HALLORAN, 2016). Além disso, nota-se que nem sempre MIB e geosmina seguem padrões parecidos, o que pode indicar sua produção por organismos distintos. Justamente por conta disso, deve-se analisar essas substâncias separadamente.

3.4 MODELAGEM MATEMÁTICA

Entender e modelar as substâncias que causam gosto e odor deveriam ser uma prioridade para as estações de tratamento, a fim de produzir água tratada de alta qualidade e reforçar a confiança da população no sistema de abastecimento público. Como resultado, grandes benefícios econômicos e sociais poderiam ser alcançados a partir do desenvolvimento e aplicação de um modelo capaz de prever acontecimentos desagradáveis de gosto e odor na água (BERTONE e HALLORAN, 2016).

Entretanto, modelar o comportamento destes compostos é extremamente desafiador, já que as causas do aparecimento destes compostos ainda são parcialmente desconhecidas (JÜTTNER e WATSON, 2007; PARINET et al., 2013).

Vários fatores afetam a presença dessas substâncias e tipicamente variam conforme o local ou o tempo (DZIALOWSKI et al., 2009), tornando sua previsão ainda mais complexa (BERTONE e O'HALLORAN, 2016). É importante salientar também que as variáveis do problema devem ser facilmente medidas, a fim de evitar custos muito altos associados às análises da água e facilitar a aplicação por operadores dos sistemas de tratamento de água (PARINET et al., 2013). O desenvolvimento de modelos preditivos para se prever a concentração destes compostos na água de reservatórios usados para abastecimento público é uma ferramenta que oferece vantagens econômicas, já que é possível otimizar o tratamento da água (PARINET et al., 2013).

Alguns estudos utilizaram modelos de regressão multilinear que continham parâmetros comuns associados com a produção de fitoplâncton para prever as concentrações dos compostos que causam gosto e odor, por exemplo turbidez, clorofila-a, fósforo, nitrogênio e o biovolume de cianobactérias (DZIALOWSKI et al., 2009). Outros trabalhos utilizaram modelos não lineares para prever essas concentrações, incluindo uma gama maior de parâmetros químicos, físicos e biológicos (PARINET et al.; 2010; PARINET et al.; 2013; KEHOE et al.; 2015; BERTONE e HALLORAN, 2016).

Kehoe et al. (2015) desenvolveram modelos lineares e não lineares (florestas aleatórias) para a previsão de eventos de gosto e odor em um reservatório de abastecimento de água no Canadá. Eles utilizaram parâmetros da qualidade da água e também da comunidade de algas presentes, como clorofila-a, fósforo total, temperatura, turbidez e contagem de fitoplânctons. O método não linear chamado de florestas aleatórias é cada vez mais utilizado para modelar e compreender os sistemas ambientais e consiste em um conjunto de métodos de aprendizado de máquinas que constrói uma função não linear baseada na resposta média de um conjunto de modelos de árvore de decisão mais simples. Os autores concluíram que, apesar de ambos os modelos fornecerem bons ajustes aos dados, o modelo não linear de florestas aleatórias apresentou resultado melhor do que o modelo de regressão linear.

Bertone e O'Halloran (2016) analisaram vários parâmetros da qualidade da água de um reservatório da Austrália, como temperatura da água, biovolume de algas,

nutrientes (como fósforo e nitrogênio) e as concentrações de MIB e geosmina. Eles selecionaram alguns prováveis inputs e, em seguida, utilizaram Mapas Auto Organizáveis (Self-Organizing Maps - SOMs) para analisar a existência de correlações entre essas variáveis. SOMs possuem um objetivo análogo à Análise de Componentes Principais (ACP) e constituem um tipo de rede neural artificial (RNA) que produzem mapas ordenados topologicamente baseados na classificação dos dados (inputs) (PERKINS et al., 2019). Esses mapas ordenam as variáveis em níveis e em cores, o que possibilita uma identificação mais rápida de padrões similares entre as variáveis em estudo, facilitando a compreensão da interação dos parâmetros de sistemas mais complexos. Finalmente, esses autores utilizaram o modelo de árvores de regressão para analisar a taxa de aumento diária de geosmina, avaliando os seguintes parâmetros, em ordem: temperatura da água, biovolume total de *Microcystis* ou *Dolichospermum*, nitrogênio oxidável e concentração de geosmina da amostra anterior. Este modelo prevê uma hipótese estrutural simples do surgimento dos picos de geosmina e das variáveis relevantes a este processo.

Parinet et al. (2013) avaliaram a performance de duas abordagens distintas para prever as concentrações de geosmina em três fontes de água no Canadá: regressão multilinear e regressão não linear (utilizando redes neurais artificiais). Para a modelagem por regressão multilinear, foram testados dois modelos distintos e para o método de RNA, foram testados cinco modelos diferentes. Na modelagem não linear, foi utilizado o método Perceptron Multicamadas (PMC), capaz de estabelecer relações complexas entre preditores (inputs) e variáveis preditas (outputs). A modelagem não linear no geral apresentou melhores resultados, em especial o modelo que utilizava variáveis associadas com os mesmos componentes principais que descrevem a geosmina. Analisando os modelos que utilizaram componentes principais, constatou-se que o desempenho do modelo com abordagem não linear foi maior do que do modelo com abordagem linear. Porém, geralmente é desejável um modelo mais simples que contenha variáveis de fácil medição. Sendo assim, os autores concluíram que o modelo mais simples baseado na regressão multilinear foi capaz de prever satisfatoriamente a geosmina, utilizando como dados de entrada apenas os parâmetros de clorofila-a, total de algas verdes, potencial redox e feofetina (PARINET et al., 2013).

Entre as ferramentas utilizadas, a regressão multilinear e regressão por componentes principais são de fácil aplicação. Entretanto, algumas desvantagens estão atreladas a esses métodos, como por exemplo a colinearidade ou não-linearidade desses processos, já que ecossistemas são sistemas não lineares cujas variáveis biológicas e físico-químicas interagem entre si de forma complexa (KEHOE et al., 2015). Sendo assim, o uso de modelos envolvendo redes neurais artificiais vem aumentando cada vez mais e mostram ser uma alternativa vantajosa para esses estudos de predição dos eventos de gosto e odor (PARINET et al., 2013).

3.5 O RESERVATÓRIO JUNDIAÍ

O reservatório Jundiaí faz parte do Sistema Produtor Alto Tietê (SPAT) da Companhia de Saneamento do Estado de São Paulo, localizado entre Suzano e Salesópolis. Esse sistema foi concebido para o abastecimento de alguns municípios da região metropolitana de São Paulo, sendo formado pelos rios Tietê, Claro, Paraitinga, Biritiba, Jundiaí, Grande, Doce, Taiaçupeba-Mirim, Taiaçupeba-Açu e Balainho. São tratados 15 mil litros de água por segundo na ETA Taiaçupeba em Suzano que atende atualmente cerca de 5 milhões de pessoas da zona leste da capital e dos municípios de Arujá, Itaquaquecetuba, Poá, Ferraz de Vasconcelos, Suzano e partes de Mogi das Cruzes e de Guarulhos (DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA, 2012), (SABESP, [s.d.]). Esse sistema é composto pelas represas de Ponte Nova, Paraitinga, Biritiba, Jundiaí e Taiaçupeba, que juntas possuem uma capacidade de armazenamento de cerca de 575 bilhões de litros, formando o segundo maior sistema da Região Metropolitana de São Paulo, atrás do Sistema Produtor Cantareira, com capacidade de quase 1 trilhão de litros de água.

O sistema de bombas e barragens é operado pelo DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica) do Governo do Estado de São Paulo. Dentre os objetivos dos reservatórios do sistema produtor Alto Tietê destaca-se o atendimento à demanda de água para abastecimento público, industrial e dos produtores agrícolas do chamado “cinturão verde de Mogi das Cruzes”. Além disso, o monitoramento e a

regularização das vazões dos rios proporcionam o controle de enchentes nos períodos com chuvas intensas (DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica, 2012).

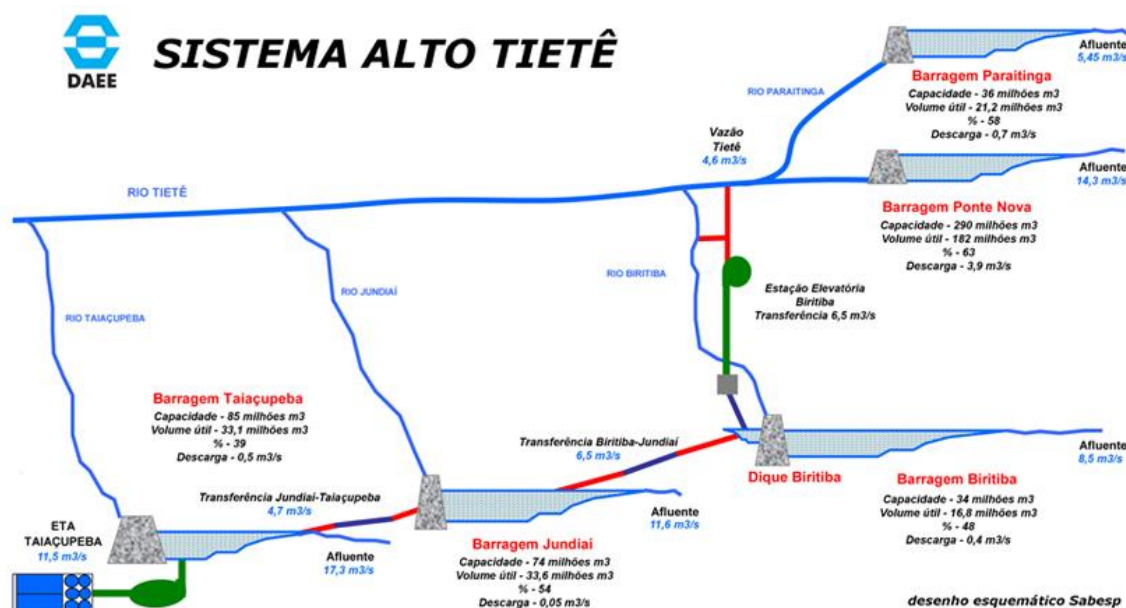
As águas da represa Ponte Nova são liberadas para o rio Tietê (Figura 3), assim como as águas da represa do rio Paraitinga também são descarregadas no rio Tietê. A jusante desses reservatórios, parte das águas do Tietê são transportadas por um canal até uma estação elevatória que as levam para a represa de Biritiba. São cinco conjuntos de moto-bombas com capacidade para 10 m³/s, vencendo um desnível de 22 m. Da represa de Biritiba as águas são transportadas para a represa Jundiaí e em seguida para a represa Taiaçupeba, através de um sistema de canais e túneis. Por fim, na represa Taiaçupeba há a captação para a estação de tratamento de água da SABESP, para que a água seja tratada e distribuída aos sistemas interligados. (DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica, 2012).

O sistema implantado pelo DAEE é administrado e operado em parceria com a SABESP e a BAT (Diretoria da Bacia do Alto Tietê e Baixada Santista), que também conta com o apoio do GTMH-SPAT (Grupo Técnico de Monitoramento Hidrológico do Sistema Produtor Alto Tietê) (DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica, 2012).

O intuito é garantir o abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo nos próximos anos, pois os sistemas produtores da SABESP, na Bacia do Alto Tietê, já estão operando próximos da sua capacidade limite em comparação com a demanda atual, estimada em cerca de 70 m³/s, e cujo crescimento acelerado é originário do excessivo aumento populacional da região na última década (DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica, 2012).

As águas do reservatório Jundiaí são transferidas por um canal para a represa Taiaçupeba. Nessa represa, o tempo de residência é muito baixo por conta da alta vazão de captação. Dessa forma, os eventos de crescimento de cianobactérias e lançamentos de suas substâncias que causam gosto e odor são influenciados diretamente pelas condições do reservatório Jundiaí.

Figura 3 – Sistema Alto Tietê de abastecimento de água.

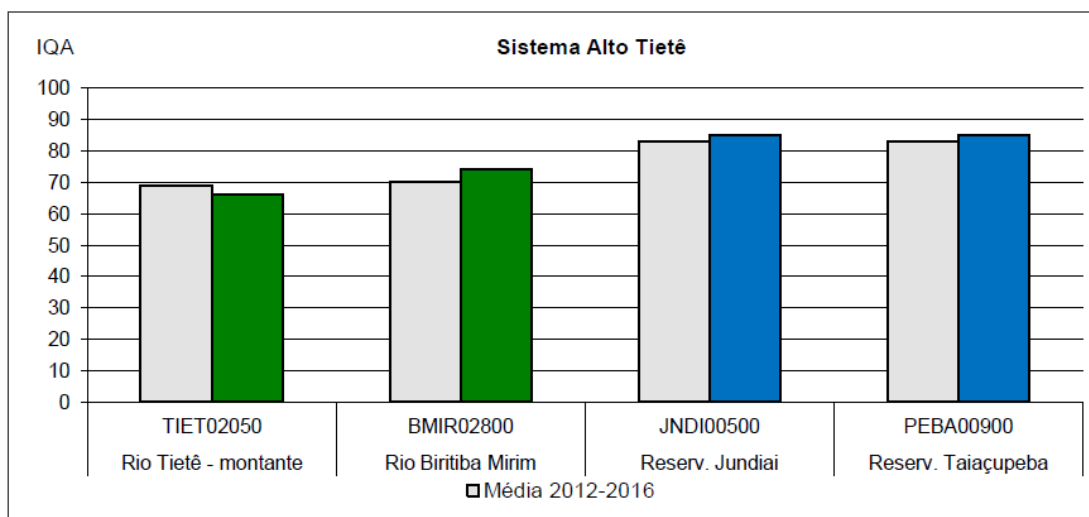


Fonte: (DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica, 2012)

Além da Sabesp, que monitora a qualidade da água do Sistema Alto Tietê, incluindo o reservatório Jundiaí, por questões estratégicas de operação da captação e tratamento da água, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) monitora a qualidade das águas superficiais do Estado de São Paulo e lança anualmente esses dados em um relatório. No último relatório de 2017, o Índice de Qualidade das Águas (IQA) do reservatório Jundiaí (Figura 4) manteve-se nas categorias boa (cor verde) e ótima (cor azul). O IQA determina a qualidade da água em termos de nove parâmetros físicos e químicos, que indicam principalmente a contaminação por efluentes sanitários. Todavia, o Índice de Qualidade da Água para fins de Abastecimento Público (IAP), que avalia a qualidade dessas águas incorporando as variáveis do IQA, além de substâncias tóxicas e as variáveis que afetam a qualidade organoléptica da água (Figura 5), apresentou-se ruim na média dos anos de 2012 a 2016 ($IAP \leq 25$) para a represa Jundiaí e boa para a Taiaçupeba ($50 < IAP \leq 60$), onde as águas do Jundiaí são lançadas antes da captação para o tratamento. O IAP é o produto da ponderação dos resultados atuais do IQA e do ISTO (Índice de Substâncias Tóxicas e Organolépticas) (CETESB, 2017). Para maiores

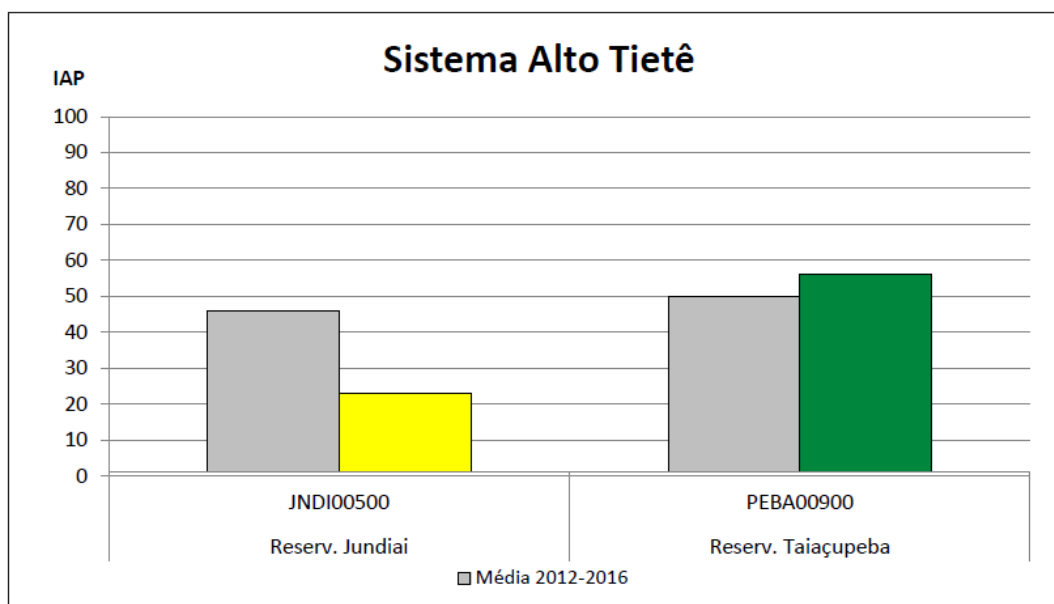
detalhes desse índice, ver (CETESB, 2017) ou o site dessa companhia (www.cetesb.sp.gov.br).

Figura 4 – Média do IQA nos últimos cinco anos nos reservatórios do sistema Alto Tietê.



Fonte: (CETESB, 2017)

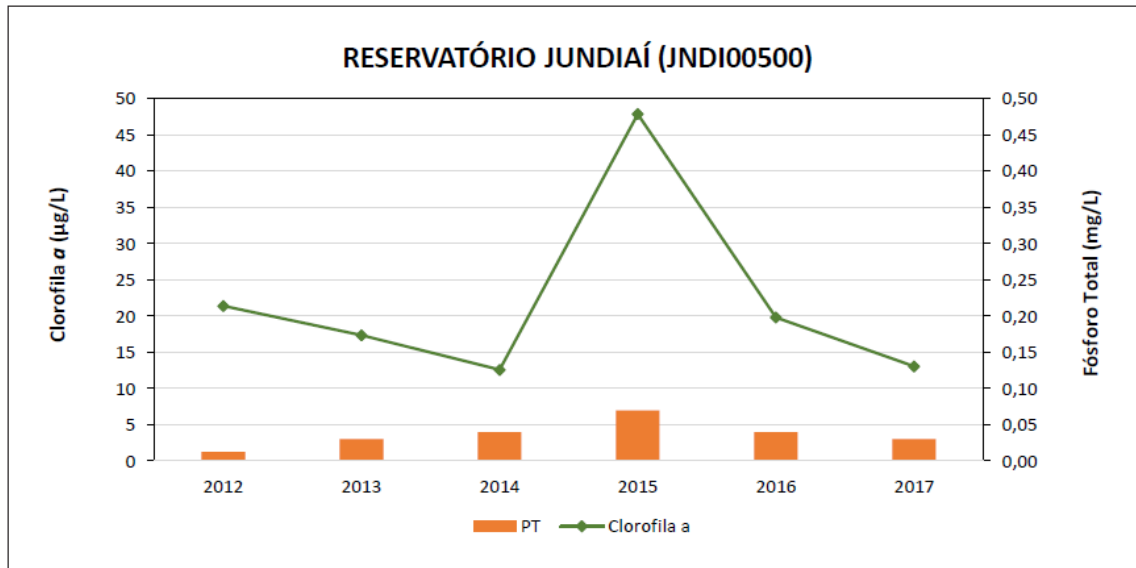
Figura 5 – Média do IAP dos últimos cinco anos nos reservatórios Jundiaí e Taiaçupeba.



Fonte: (CETESB, 2017)

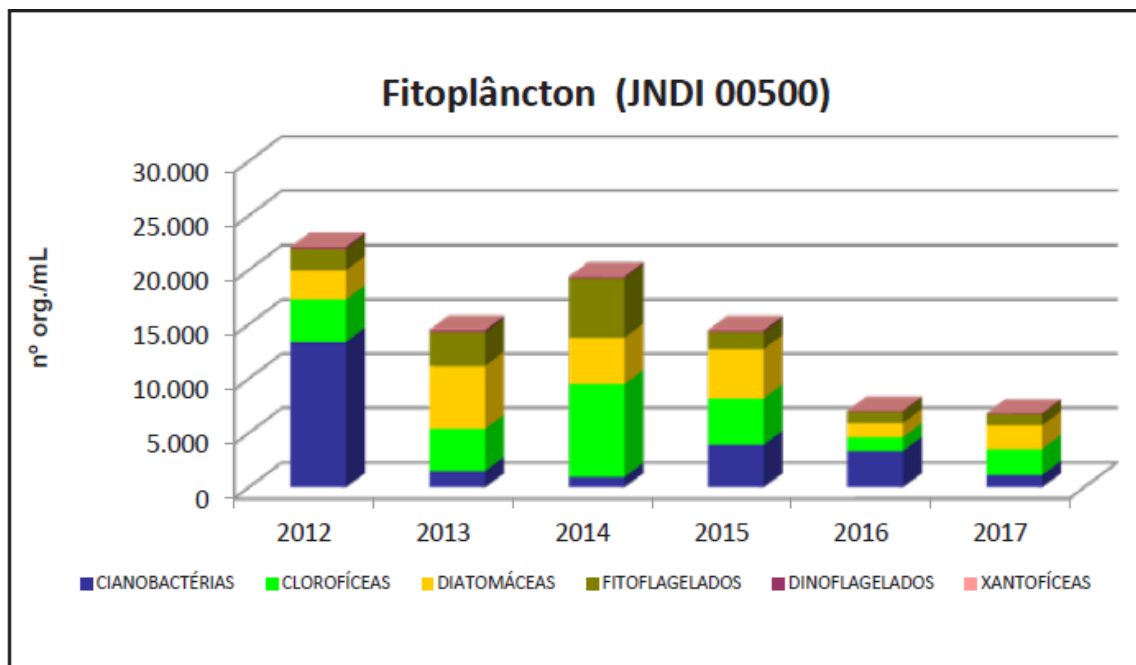
Observa-se na Figura 6 que o decréscimo da concentração de clorofila-a foi interrompido em 2015, momento em que ocorreu um aumento significativo nessa concentração e novamente um decréscimo nos anos posteriores; enquanto que a concentração de fósforo total (PT) manteve-se em um valor próximo (exceto pelo menor valor em 2012 e pelo aumento repentino em 2015). Observou-se que após a crise hídrica de 2014, quando o reservatório chegou a um estado crítico (PORTAL G1, 2017), a concentração de cianobactérias diminuiu (Figura 7 e Figura 8), aumentando em 2015 e decrescendo nos anos seguintes. A Figura 7 mostra que nesse reservatório não houve mudanças significativas na densidade de fitoplâncton entre os anos de 2016 e 2017, porém a composição da comunidade desses microrganismos passou a ter maior contribuição de clorófitas e diatomáceas.

Figura 6 – Monitoramento das concentrações de fósforo total e clorofila-a pela CETESB no reservatório Jundiaí nos anos de 2012 a 2017.



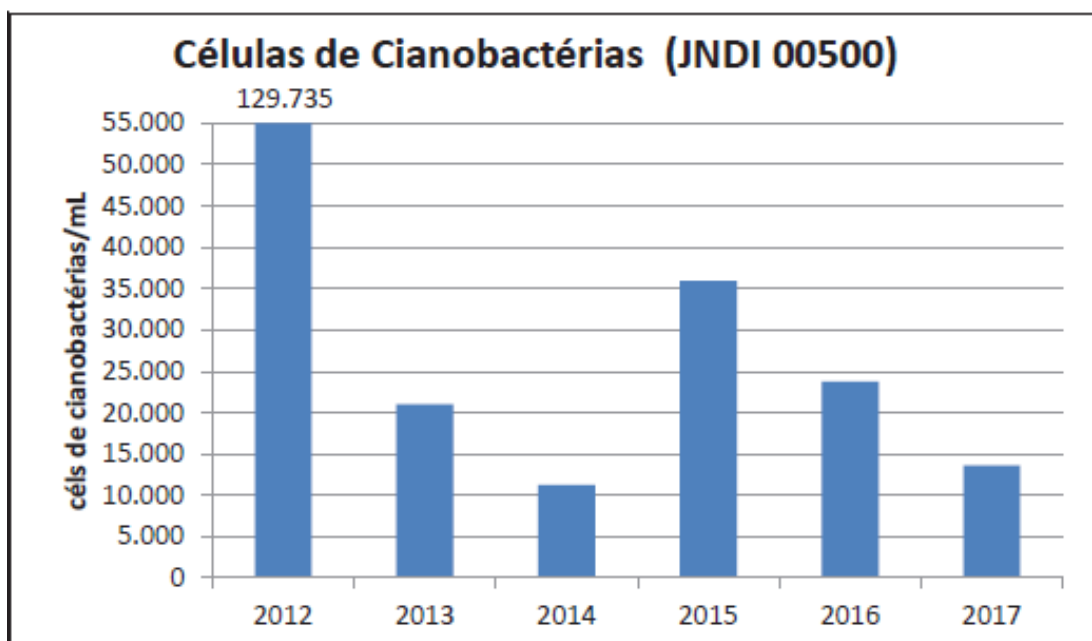
Fonte: (CETESB, 2017)

Figura 7 – Monitoramento de fitoplâncton pela CETESB no reservatório Jundiá nos anos de 2012 a 2017.



Fonte: (CETESB, 2017)

Figura 8 – Quantificação das células de cianobactérias pela CETESB no reservatório Jundiá nos anos de 2012 a 2017.



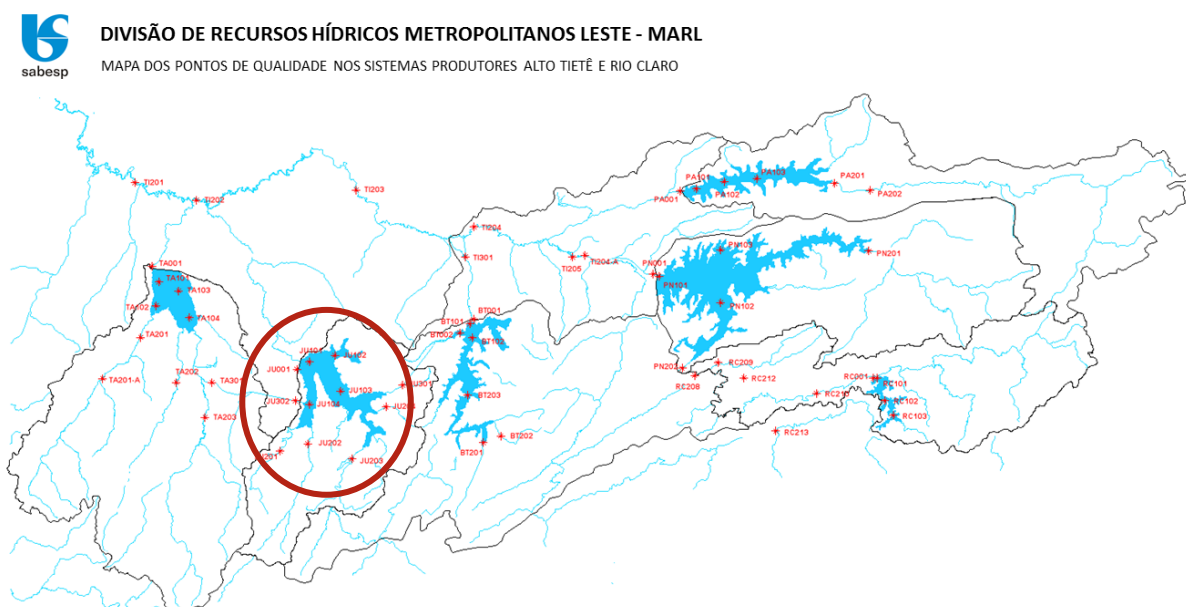
Fonte: (CETESB, 2017)

4. MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A Figura 9 apresenta os pontos de monitoramento da qualidade da água da SABESP no Sistema Alto Tietê. Neste trabalho, foram utilizados os pontos JU-101, JU-102, JU-103 e JU-104.

Figura 9 – Pontos de monitoramento da SABESP no Sistema Alto Tietê.



Fonte: Comunicação pessoal.

4.2 DADOS COLETADOS

Os dados para o desenvolvimento deste trabalho foram fornecidos pela SABESP. Diversos parâmetros físico-químicos e biológicos foram medidos semanalmente entre os anos de 2008 e 2017, bem como os compostos MIB e Geosmina.

Para facilitar a análise do comportamento do processo, os parâmetros monitorados nos quatro pontos da represa Jundiaí foram classificados em categorias, como é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros físicos, químicos e biológicos monitorados na represa Jundiaí.

Parâmetro	Abreviação	Unidade	Classificação
Geosmina	GEO	ngL ⁻¹	Substância
2-Metilisoborneol	MIB	ngL ⁻¹	Substância
Cianobactérias	-	célsmL ⁻¹	Cianobactérias
Saxitoxina	SXT	µgL ⁻¹	Cianobactérias
Clorofila-A	Clorof-A	µgL ⁻¹	Eutrofização
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO ₅	mgL ⁻¹	Eutrofização
Nitrogênio Albuminóide	N alb	mg NL ⁻¹	Eutrofização
Nitrogênio Amoniacal	N-NH ₃	mg NL ⁻¹	Eutrofização
Oxigênio Dissolvido	OD	mgL ⁻¹	Eutrofização
Fósforo Total	P tot	mg PL ⁻¹	Eutrofização
pH	pH	-	Eutrofização
Feofetina-a	Feof-a	µgL ⁻¹	Eutrofização
Fosfato Total	PO ₄ tot	mg PL ⁻¹	Eutrofização
Nitrato	NO ₃	mg NL ⁻¹	Eutrofização
Condutividade	Condut	µS/cm	Metais
Alumínio Dissolvido	Al dis	mgL ⁻¹	Metais
Cobre Dissolvido	Cu dis	mgL ⁻¹	Metais
Ferro Dissolvido	Fe dis	mgL ⁻¹	Metais
Manganês Total	Mn tot	mgL ⁻¹	Metais

Tabela 4 – Parâmetros físicos, químicos e biológicos monitorados na represa Jundiáí.

Parâmetro	Abreviação	Unidade	Classificação
Profundidade Total	ProfTot	m	Luz
Transparência	Transp	m	Luz
Turbidez	Turb	NTU	Luz
Cor Aparente	Cor Apar	UC	Luz
Sólidos Dissolvidos Totais	SDT	mgL ⁻¹	Luz
Profundidade de Coleta	ProfCole	m	Luz
Chuva	Chuva	mm	Climático
Temperatura da Água	T	°C	Climático
Temperatura da Amostra	TAmos	°C	Climático
Temperatura do Ar	TAr	°C	Climático
Vazão Média	Vazão	m ³ s ⁻¹	Vazão
Sulfato de Cobre	Sulf C	kg	Algicida
Peróxido de Hidrogênio	Per H	kg	Algicida

A Tabela 5 apresenta os microrganismos monitorados nos quatro pontos da represa Jundiáí. Os parâmetros em negrito representam as cianobactérias que comprovadamente produzem MIB e GEO, de acordo com a Tabela 3. A fim de comparação, apenas os microrganismos em negrito foram utilizados nas análises estatísticas.

Tabela 5 – Microrganismos monitorados no reservatório Jundiáí.

Abreviação	Microrganismo	Abreviação	Microrganismo
Chrooco	<i>Chroococcales</i>	Oscill	<i>Oscillatoria</i>
Cyl	<i>Cylindrospermopsis</i>	PI	<i>Planktothrix</i>

Tabela 5 – Microrganismos monitorados no reservatório Jundiaí.

Abreviação	Microrganismo	Abreviação	Microrganismo
Meris	<i>Merismopedia</i>	Apha	<i>Aphanizomenon</i>
Microcys	<i>Microcystis</i>	Pho	<i>Phormidium</i>
Os	<i>Oscillatoriales</i>	Cy	<i>Cyanobacteria</i>
Psa	<i>Pseudanabaena</i>	Li	<i>Limnothrix</i>
Ps	<i>Pseudanabaenaceae</i>	Cyanog	<i>Cyanogranis</i>
Me	<i>Merismopediaceae</i>	Cuspi	<i>Cuspidothrix</i>
Gloeoca	<i>Gloeocapsa</i>	Epi	<i>Epigloesphaera</i>
Aph	<i>Aphanothece</i>	Snow	<i>Snowella</i>
week_Ph	<i>Phormidiaceae</i>	Coelo	<i>Coelomoron</i>
Aphano	<i>Aphanocapsa</i>	Dolic	<i>Dolichospermum</i>
Pla	<i>Planktolyngbya</i>	SXT	
Gl	<i>Geitlerinema</i>		

4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Todos os dados coletados foram normalizados, de forma que dados com magnitudes muito diferentes não possam ser considerados mais relevantes ao processo do que outros, cujas magnitudes sejam muito menores.

Utilizando o Software Statistica, licenciado pela UNIFESP, foram realizadas análises de componentes principais e regressões multilíneas para se observar a relação entre as características extraídas dos dados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ÍNDICE DE EUTROFIZAÇÃO NO RESERVATÓRIO JUNDIAÍ

Para melhor compreensão do fenômeno do aparecimento de MIB e geosmina no reservatório Jundiaí, calculou-se o Índice de Eutrofização (IET) global para cada ponto de monitoramento utilizando-se as Equações (1), (2) e (3), que utilizam os dados de Clorofila-A e Fósforo Total. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6 e na Figura 10, que mostra a média anual do IET global. Comparando os resultados obtidos com os dados da Tabela 1, conclui-se que o reservatório Jundiaí se enquadra na categoria eutrófico, possuindo também alguns episódios de supereutrofização.

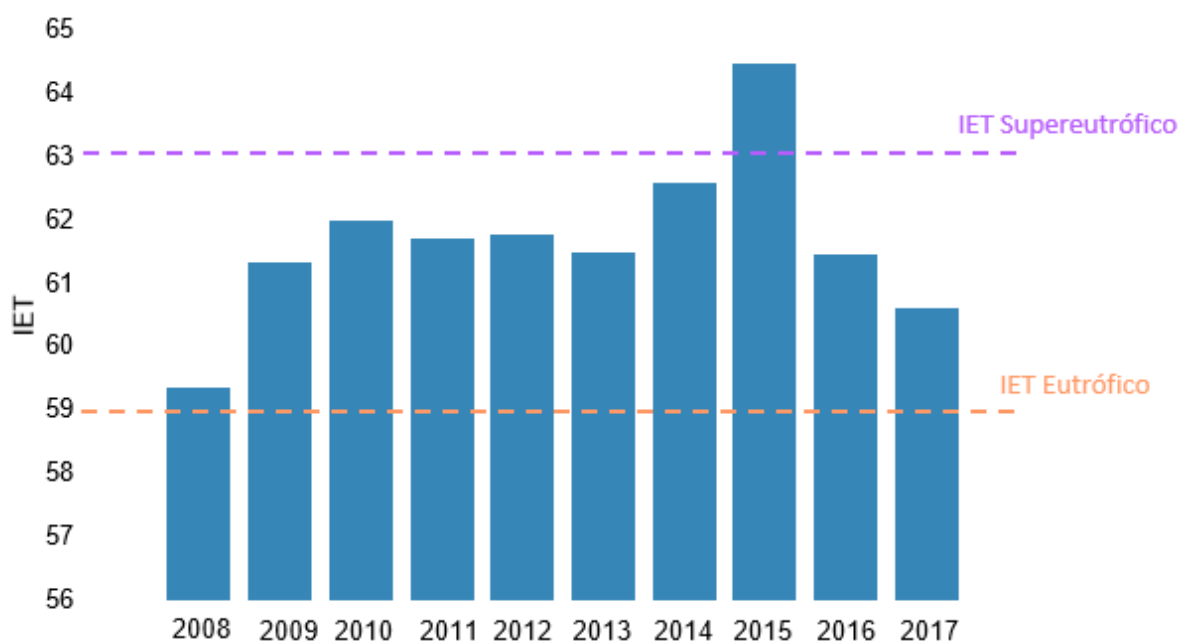
Tabela 6 – Média Mensal do IET global para o reservatório Jundiaí.

Mês	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Jan	58,8	61,3	62,0	62,5	62,6	61,3	61,9	62,0*	63,4	61,8
Fev	63,5	63,5*	62,6	60,7	59,1	61,4	63,1	62,6	62,9	65,9
Mar	61,9	61,9*	61,9	59,8	62,8	61,5	65,2	55,9	62,5	59,4
Abr	60,5	62,7*	60,3	58,0	63,8	59,8	65,7	60,7	60,3	63,1
Mai	56,7	66,4*	62,0	61,3	64,9	63,3	62,1	64,8	62,5	61,0
Jun	59,4	67,9*	60,0	62,3	62,3	58,8	63,6	64,7*	61,9	59,6
Jul	57,5	67,5*	61,2	61,2	59,8	59,3	65,3	66,0*	64,1	60,6
Ago	57,3	67,3*	62,1	62,1	61,6	62,1	59,6	63,4	60,0	59,9
Set	59,5	67,1*	62,0	63,0	58,8	61,6	60,8	64,4	60,2	56,9
Out	57,6	66,4*	63,5	63,1	61,2	64,0	63,6	69,5	60,3	59,7
Nov	59,9	67,4*	63,4	61,8	63,3	62,2	63,1	66,1	60,1	59,6
Dez	61,0	62,9*	62,7	64,6	63,3	63,7	56,1	-	-	61,0

* Dados do IET (P Tot)

Como o IET global se relaciona com a eutrofização do ambiente, valores maiores desse índice significam que o meio aquático possui maior quantidade de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo.

Figura 10 – Média Anual do IET global para o reservatório Jundiaí.



Fonte: Elaboração do autor.

Observou-se que no ano de 2015, o reservatório Jundiaí apresentou a média anual do IET na categoria supereutrófico. Isso pode ser explicado pelo fato de que no ano anterior (2014) ocorreu uma crise hídrica na região, que decresceu o nível do reservatório Jundiaí a um nível crítico. Sendo assim, como o volume da água deste reservatório diminuiu, a concentração das substâncias presentes no meio aquático consequentemente aumentou. Tal fato levou o Jundiaí a apresentar níveis altos de nutrientes e, portanto, altos valores para o IET global.

5.2 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAS E REGRESSÃO MULTILINEAR

A Análise de Componentes Principais (ACP) foi utilizada de forma a converter as variáveis originais monitoradas pela SABESP (físico-químicas e biológicas) em novas variáveis (denominadas componentes principais), que são ortogonais e não correlacionadas entre si. Essa ferramenta oferece um método objetivo para a análise de grandes quantidades de dados, reduzindo a complexidade de sistemas multidimensionais.

A partir dos dados coletados na represa Jundiaí, utilizou-se o software Statistica para gerar os gráficos de componentes principais. Como discutido na Seção 4.2, a fim de facilitar a análise e a visualização gráfica, os parâmetros foram divididos em classes e para cada uma delas foi feito um gráfico de Componentes Principais (CP), como é apresentado na Figura 11. Para a construção dos gráficos, foram utilizados apenas os dois primeiros fatores (também denominados de componentes) de cada análise, cuja representação da variância total dos componentes se encontrou entre 20,71% no caso dos componentes de eutrofização e 42,13% no caso dos componentes climáticos, como é possível observar na Figura 13.

A Figura 11a mostra a relação entre MIB e Geosmina e as principais cianobactérias que produzem estes compostos, de acordo com a literatura (apresentado na Tabela 3). É possível observar que a *Dolichospermum* (Dolic, denominada anteriormente como *Anabaena*) possui uma forte correlação com a geosmina, bem como a *Pseudanabaena* e a *Pseudanabaenaceae* (família à qual pertence o gênero *Pseudanabaena*) possuem uma forte correlação com o MIB. Devido a isso, os demais gráficos de CP possuem os parâmetros Dolic, Psa e Ps, para analisar o comportamento desses microrganismos em relação aos demais parâmetros estudados. Essa observação indica que essas cianobactérias são as principais responsáveis pela produção destes compostos no reservatório Jundiaí, como também é possível observar na Tabela 7, que mostra a correlação mais forte entre essas cianobactérias e os compostos em estudo. Entretanto, ressalta-se que essa matriz de correlação apenas representa a linearidade entre os parâmetros, deixando de lado a não linearidade que está presente nos estudos de ecossistemas.

Com relação aos fatores de eutrofização (Figura 11b), notou-se que as substâncias MIB e geosmina não apresentaram correlação significativa com o

nitrogênio do local (representado por N_{alb} , NO_3 e $N-NH_3$) ou com o fósforo presente, porém se correlacionam positivamente com o OD e pH. Isso faz sentido pois a quantidade de oxigênio dissolvido é diretamente proporcional à quantidade de cianobactérias presentes, já que o OD está relacionado com a produção fotossintética desses microrganismos na água do reservatório. Entretanto, ao contrário do que foi encontrado neste estudo, alguns autores como Parinet et al. (2013) e Olsen et al. (2016) concluíram que os nutrientes presentes na água desempenham um papel relevante para a determinação dessas substâncias. Uma possível explicação para isso pode ser dada pelo fato de que o reservatório, durante todo o período monitorado, foi classificado como eutrófico (apresentando também episódios de supereutrofização). Dessa forma, o lago já possui quantidades significativas desses nutrientes e suas concentrações não afetam a quantidade de MIB e geosmina presentes na água. Além disso, percebe-se também uma correlação positiva entre a clorofila-A e esses compostos, principalmente com a geosmina. Isso pode ser explicado pela produção de clorofila por parte dos microrganismos que produzem essas substâncias. Essa observação é confirmada nos estudos realizados por Perkins et al. (2019) e Parinet et al. (2013), que também encontraram correlação positiva entre a clorofila-A e os compostos que causam gosto e odor na água. A Tabela 7 apresenta a correlação moderada entre OD, Clorof-A e pH (em negrito) e a fraca correlação entre os nutrientes (itálico) com MIB e geosmina.

Não foram encontradas correlações significativas entre os metais presentes na água do reservatório Jundiaí e a concentração de MIB e geosmina, como observa-se na Figura 11 e na Tabela 8, o que também foi constatado no estudo realizado por Schrader e Blevins (2001). Porém, Parinet et al. (2010) observou uma boa correlação apenas entre o manganês e esses compostos. Essas observações indicam que a influência de metais na presença de MIB e geosmina pode variar dependendo das condições estudadas, mas que em geral os metais não exercem grande influência na concentração dessas substâncias.

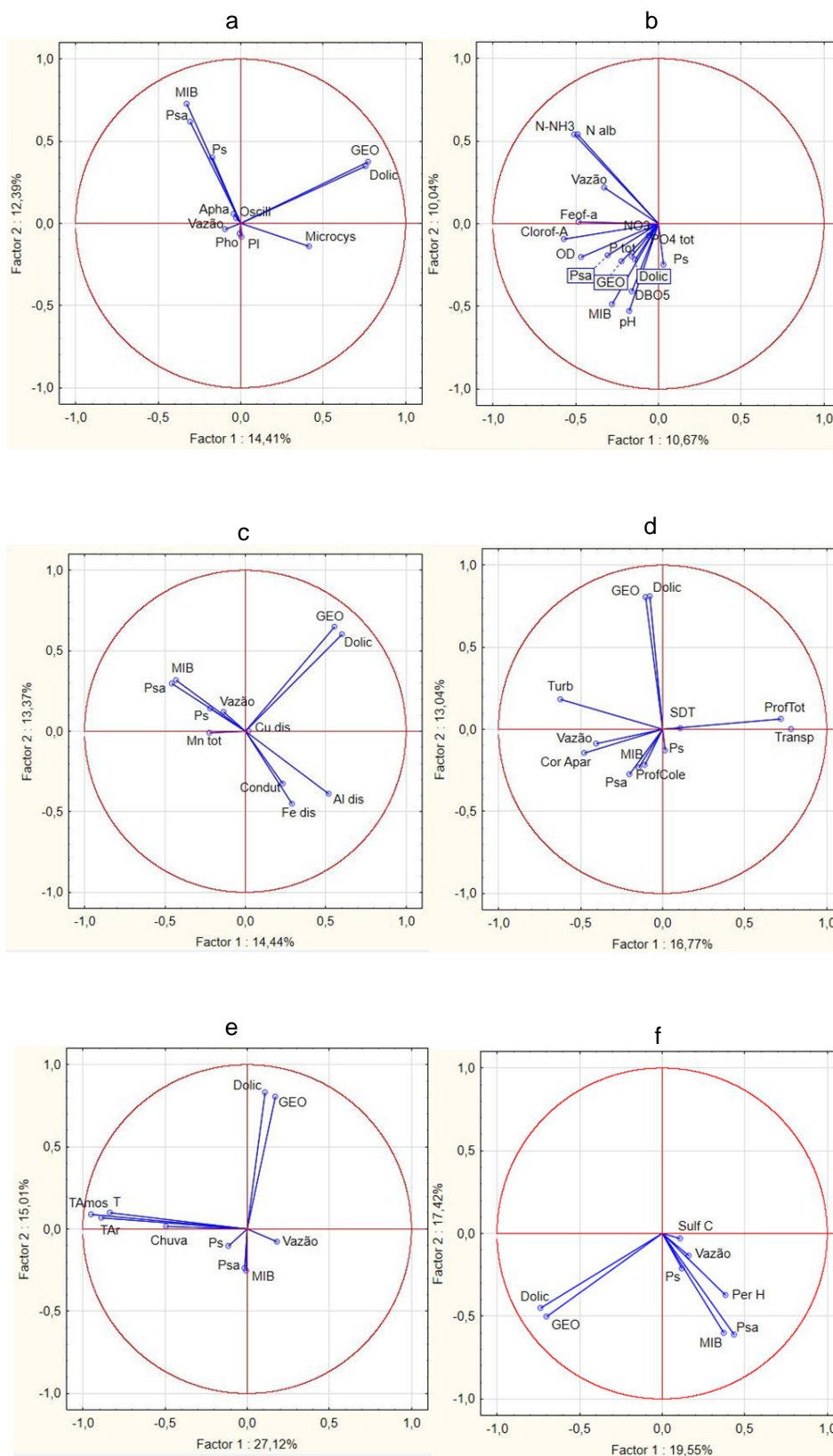
Os parâmetros relacionados à luz não aparentaram exercer muita influência nas concentrações dos compostos que causam gosto e odor, com exceção da turbidez e cor aparente, que possuem correlação levemente moderada com MIB e

geosmina, como apresentado na Figura 11 e na Tabela 8. Isso pode ser explicado pelo fato de que esses parâmetros podem ser causados pela presença de cianobactérias no local. Alghanmi et al. (2018) chegaram a resultados parcialmente semelhantes, já que não encontraram correlação entre luz e esses compostos. Entretanto, os autores concluíram que a produção dessas substâncias estava relacionada a valores ótimos deste parâmetro.

Os parâmetros climáticos (T, TAmos, TAr e Chuva) também não apresentaram muita influência nas concentrações de MIB e geosmina, como pode-se observar na Figura 11 e na Tabela 9, indicando correlações bem fracas com essas substâncias. Alghanmi et al. (2018) chegaram a resultados parecidos, já que também não encontraram correlação entre temperatura e esses compostos. Entretanto, os autores concluíram que a produção dessas substâncias estava relacionada a valores ótimos deste parâmetro.

Na Figura 11f, o gráfico de CP mostra que a geosmina está negativamente correlacionada com ambos algicidas, porém a correlação entre este composto e o peróxido de hidrogênio é bem fraca, já com o sulfato de cobre esta correlação é levemente moderada. Isso pode ser explicado pelo fato do CuSO_4 ser utilizado para matar as cianobactérias do gênero *Dolichospermum*, que estão relacionadas à produção de geosmina. Sendo assim, quando a quantidade deste algicida aumenta, a quantidade de Dolic diminui e consequentemente a concentração de GEO também diminui. O MIB possui correlação positiva bem fraca com o sulfato de cobre e correlação positiva levemente moderada com o peróxido de hidrogênio, o que indica que ambos algicidas são adicionados nas águas do reservatório Jundiaí quando a concentração deste composto é detectada, principalmente o Per H. Esse efeito é contrário do efeito que ocorre com a geosmina, o que pode indicar que, durante as coletas realizadas, o algicida ainda não havia agido para diminuir o número das principais cianobactérias produtoras de MIB (Psa e Ps). Essas correlações são apresentadas na Tabela 9.

Figura 11 – Análise de Componentes Principais com as substâncias que causam gosto e odor e cada classificação de parâmetro. **a** Cianobactérias. **b** Eutrofização. **c** Metais. **d** Luz. **e** Climático. **f** Algicidas



Percebe-se que as principais cianobactérias retiradas da literatura exercem maior influência na concentração destes compostos que causam gosto e odor na água, se comparada à influência exercida pelos parâmetros ambientais abióticos monitorados no reservatório Jundiaí. Isso pode ser constatado na Tabela 11, na Tabela 12 e também na Tabela 13, que apresentam as contribuições de cada parâmetro na construção dos componentes principais de cada Análise de CP.

A Figura 12 apresenta o gráfico de componentes principais relacionando MIB e geosmina com todas as cianobactérias monitoradas no reservatório. Nota-se que a correlação entre essas substâncias e esses microrganismos é mais forte do que a correlação existente entre esses compostos e os parâmetros ambientais físico-químicos, que não exercem grande influência no surgimento desses fenômenos de gosto e odor na água, como apresentado na Tabela 10 e na Tabela 14. Isso pode ser explicado pelo fato de que o reservatório Jundiaí é predominantemente eutrófico e possui excesso de nutrientes. Dessa forma, ocorre o evento conhecido como floração de cianobactérias, que suprimem o efeito que os parâmetros abióticos exercem sobre a concentração desses compostos. Além disso, é interessante ressaltar a correlação entre cada cianobactéria e os compostos em estudo: na Figura 12, percebe-se que alguns gêneros específicos são responsáveis pela produção de MIB e de Geosmina, o que indica que essas substâncias são produzidas por microrganismos diferentes e que possivelmente disputam entre si para sobreviver e se reproduzir, consistindo em uma interação biológica complexa. A Figura 14 mostra que as duas primeiras dimensões (fatores 1 e 2) da ACP explicam 14,86% da variância total, o que sugere que as interações entre estes microrganismos são complexas e que seria necessário analisar as demais dimensões da ACP para se ter maior compreensão das relações existentes entre os parâmetros bióticos monitorados.

Figura 12 – Análise de Componentes Principais com as substâncias que causam gosto e odor e todas as cianobactérias monitoradas.

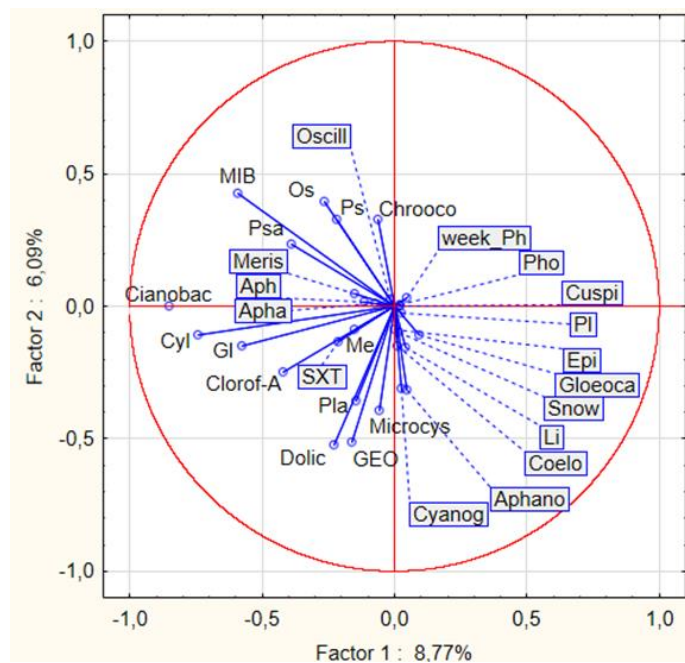


Figura 13 – Variâncias totais para os componentes principais determinados. **a** Variâncias totais para a ACP das cianobactérias presentes neste trabalho. **b** Variâncias totais para a ACP dos fatores de eutrofização. **c** Variâncias totais para a ACP dos metais. **d** Variâncias totais para a ACP dos fatores de luz. **e** Variâncias totais para a ACP dos fatores climáticos. **f** Variâncias totais para a ACP dos algicidas.

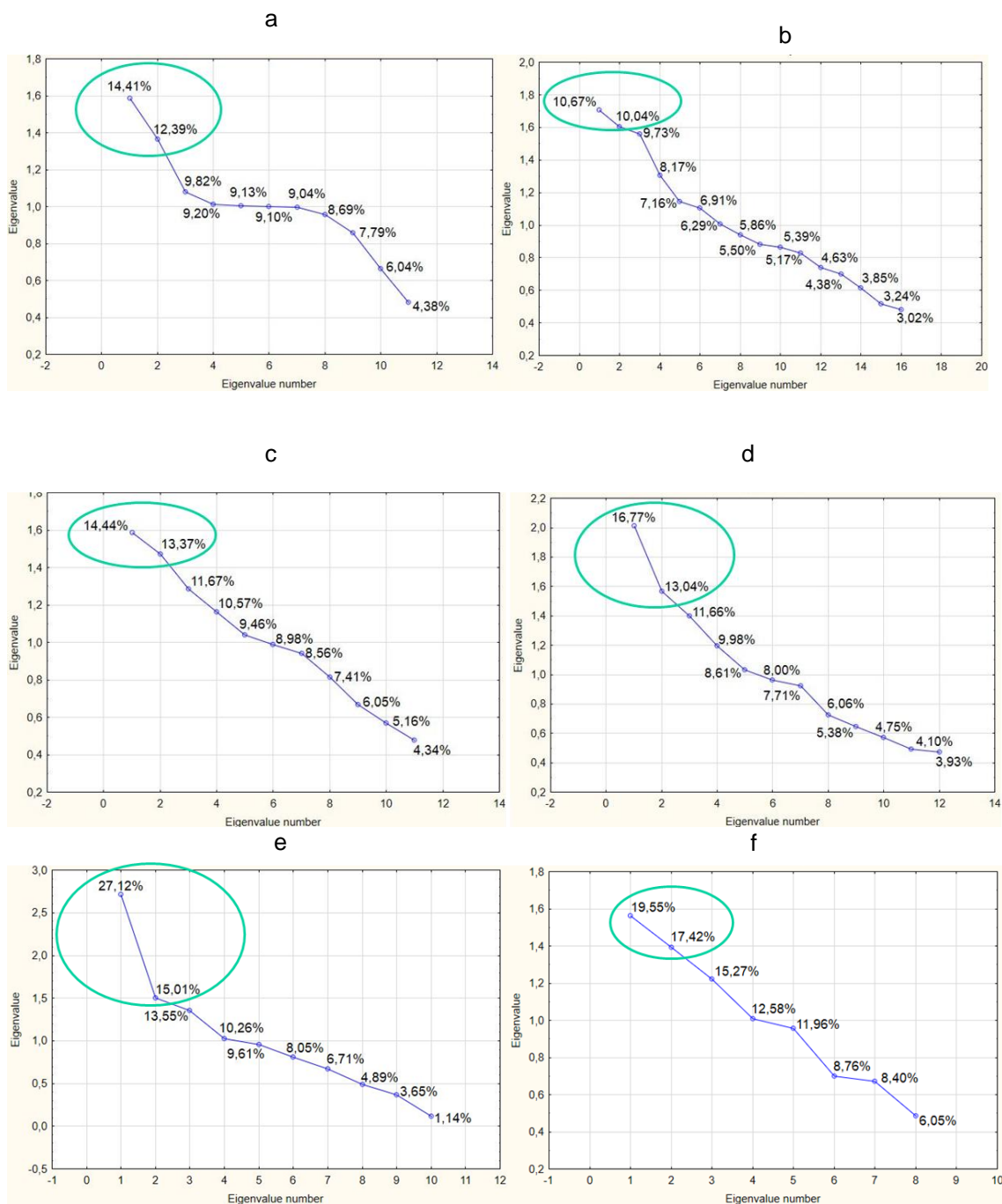


Figura 14 – Variâncias totais para a Análise de Componentes Principais das substâncias que causam gosto e odor e todas as cianobactérias monitoradas.

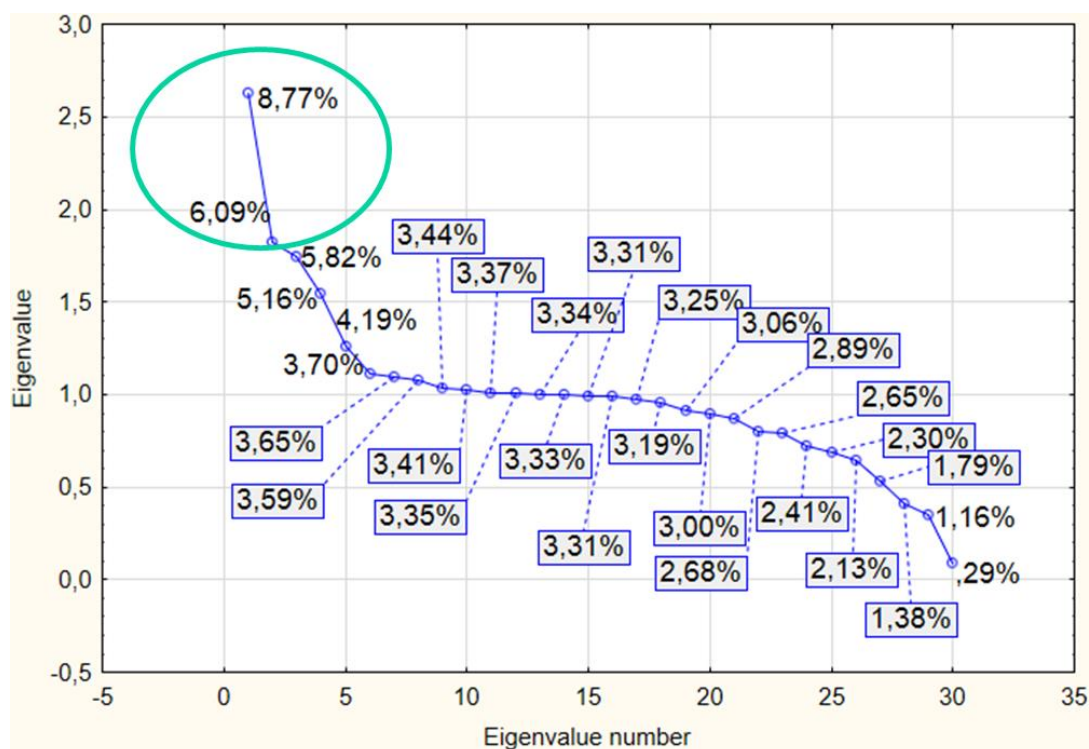


Tabela 7 – Matriz de Correlação das classificações Cianobactérias e Eutrofização.

Cianobactérias			Eutrofização		
Variável	GEO	MIB	Variável	GEO	MIB
GEO	1,0000	0,0147	GEO	1,0000	0,0147
MIB	0,0147	1,0000	MIB	0,0147	1,0000
Microcys	0,1435	-0,1121	Psa	-0,0371	0,3036
Psa	-0,0371	0,3036	Ps	-0,0148	0,1644
Ps	-0,0148	0,1644	Dolic	0,5017	-0,0472
Oscill	-0,0147	-0,0014	Clorof-A	0,0877	0,0841
PI	-0,0117	-0,0230	DBO ₅	0,0277	0,1143
Apha	-0,0075	0,0376	N alb	0,0377	-0,0464
Pho	-0,0090	-0,0067	N-NH ₃	0,0386	-0,0600

Tabela 7 – Matriz de Correlação das classificações Cianobactérias e Eutrofização.

Variável	Cianobactérias		Variável	Eutrofização	
	GEO	MIB		GEO	MIB
Dolic	0,5017	-0,0472	OD	0,0298	0,1030
Vazão	-0,0113	-0,0437	P tot	-0,0347	-0,0331
			pH	0,1005	0,1285
			Feof-A	-0,0422	0,0991
			PO ₄	-0,0201	0,0176
			NO ₃	0,0014	-0,0049
			Vazão	-0,0113	-0,0437

Tabela 8 – Matriz de Correlação das classificações Metais e Luz.

Variável	Metais		Variável	Luz	
	GEO	MIB		GEO	MIB
GEO	1,0000	0,0147	GEO	1,0000	0,0147
MIB	0,0147	1,0000	MIB	0,0147	1,0000
Psa	-0,0371	0,3036	Psa	-0,0371	0,3036
Ps	-0,0148	0,1644	Ps	-0,0148	0,1644
Dolic	0,5017	-0,0472	Dolic	0,5017	-0,0472
Condut	-0,0625	-0,0497	ProfTot	-0,0463	-0,0455
Al dis	0,0442	-0,0708	Transp	-0,0459	-0,0665
Cu dis	0,0123	-0,0138	Turb	0,1002	0,0154
Fe dis	-0,0235	-0,0327	Cor Apar	-0,1040	-0,0654
Mn tot	-0,0391	0,0215	SDT	-0,0281	-0,0422

Tabela 8 – Matriz de Correlação das classificações Metais e Luz.

Variável	Metais		Variável	Luz	
	GEO	MIB		GEO	MIB
Vazão	-0,0113	-0,0437	ProfCole	-0,0441	0,0210
			Vazão	-0,0113	-0,0437

Tabela 9 – Matriz de Correlação das classificações Climático e Algicida.

Variável	Climático		Variável	Algicida	
	GEO	MIB		GEO	MIB
GEO	1,0000	0,0147	GEO	1,0000	0,0147
MIB	0,0147	1,0000	MIB	0,0147	1,0000
Psa	-0,0371	0,3036	Psa	-0,0371	0,3036
Ps	-0,0148	0,1644	Ps	-0,0148	0,1644
Dolic	0,5017	-0,0472	Dolic	0,5017	-0,0472
Chuva	-0,0719	-0,0070	Vazão	-0,0113	-0,0437
T	-0,0627	-0,0291	Per H	-0,0177	0,0963
TAmos	-0,0742	0,0016	Sulf C	-0,0324	0,0493
TAr	-0,0943	0,0233			
Vazão	-0,0113	-0,0437			

Tabela 10 – Matriz de Correlação de todas as cianobactérias.

Variável	Cianobactérias		Variável	Cianobactérias	
	GEO	MIB		GEO	MIB
GEO	1,0000	0,0147	Oscill	-0,0147	-0,0014
MIB	0,0147	1,0000	PI	-0,0117	-0,0230
Chrooco	-0,0386	0,0576	Apha	-0,0075	0,0376
Meris	0,0095	0,0406	Pho	-0,0090	-0,0067
Microcys	0,1435	-0,1121	Li	-0,0135	-0,0151
Os	0,0069	0,3308	Cyanog	-0,0371	-0,0871
Psa	-0,0371	0,3036	Cuspi	-0,0105	-0,0114
Ps	-0,0148	0,1644	SXT	-0,0133	0,0103
Me	0,0577	-0,0342	Epi	0,0658	-0,0114
Gloeoca	-0,0365	-0,0621	Snow	-0,0128	-0,0166
Aph	-0,0346	0,1512	Dolic	0,5017	-0,0472
week_Ph	-0,0172	-0,0143	Coelo	-0,0248	-0,0290
Aphano	-0,0481	-0,0721	Clorof-A	0,0877	0,0841
Pla	0,2578	-0,0333	Cyl	0,0113	0,2929
GI	-0,0052	0,1016	Cianobac	0,0693	0,4601

Tabela 11 – Tabela de fatores das classificações Cianobactérias e Eutrofização.

Variável	Cianobactérias		Variável	Eutrofização	
	Factor 1	Factor 2		Factor 1	Factor 2
GEO	0,7715	0,3754	GEO	-0,2228	-0,2279
MIB	-0,3249	0,7264	MIB	-0,2794	-0,4891
Microcys	0,4133	-0,1403	Psa	-0,3083	-0,1937

Tabela 11 – Tabela de fatores das classificações Cianobactérias e Eutrofização.

Cianobactérias			Eutrofização		
Variável	Factor 1	Factor 2	Variável	Factor 1	Factor 2
Psa	-0,3083	0,6169	Ps	0,0325	-0,2486
Ps	-0,1718	0,3984	Dolic	-0,1416	-0,2179
Oscill	-0,0273	0,0320	Clorof-A	-0,5706	-0,0919
PI	0,0030	-0,0808	DBO ₅	-0,1592	-0,4078
Apha	-0,0413	0,0582	N alb	-0,4857	0,5385
Pho	-0,0038	-0,0597	N-NH ₃	-0,5080	0,5387
Dolic	0,7602	0,3459	OD	-0,4652	-0,2040
Vazão	-0,0939	-0,0357	P tot	-0,1598	-0,1955
			pH	-0,1778	-0,5297
			Feof-A	-0,4824	0,0134
			PO ₄	-0,0545	-0,0711
			NO ₃	-0,0461	-0,0221
			Vazão	-0,3276	0,2162

Tabela 12 – Tabela de fatores das classificações Metais e Luz.

Metais			Luz		
Variável	Factor 1	Factor 2	Variável	Factor 1	Factor 2
GEO	0,5574	-0,6510	GEO	0,1059	-0,8069
MIB	-0,4279	-0,3155	MIB	0,1079	0,2180
Psa	-0,4569	-0,2990	Psa	0,2010	0,2764
Ps	-0,2174	-0,1431	Ps	-0,0182	0,1280
Dolic	0,6020	-0,6019	Dolic	0,0764	-0,8089

Tabela 12 – Tabela de fatores das classificações Metais e Luz.

Variável	Metais		Variável	Luz	
	Factor 1	Factor 2		Factor 1	Factor 2
Condut	0,2318	0,3243	ProfTot	-0,7210	-0,0626
Al dis	0,5192	0,3894	Transp	-0,7825	0,0001
Cu dis	0,0216	-0,0006	Turb	0,6238	-0,1811
Fe dis	0,2919	0,4512	Cor Apar	0,4761	0,1446
Mn tot	-0,2231	0,0107	SDT	-0,1077	-0,0066
Vazão	-0,1328	-0,1192	ProfCole	0,1427	0,2327
	0,5574	-0,6510	Vazão	0,4036	0,0883

Tabela 13 – Tabela de fatores para as classificações Climático e Algicida.

Variável	Climático		Variável	Algicida	
	Factor 1	Factor 2		Factor 1	Factor 2
GEO	0,1732	0,8072	GEO	-0,7000	-0,5054
MIB	-0,0144	-0,2388	MIB	0,3761	-0,6032
Psa	-0,0030	-0,2548	Psa	0,4353	-0,6100
Ps	-0,1131	-0,1037	Ps	0,1209	-0,2126
Dolic	0,1105	0,8299	Dolic	-0,7374	-0,4486
Chuva	-0,4924	0,0155	Vazão	0,1597	-0,1337
T	-0,8355	0,0973	Per H	0,3830	-0,3708
TAmos	-0,9479	0,0884	Sulf C	0,1103	-0,0279
TAr	-0,8860	0,0689			
Vazão	0,1814	-0,0753			

Tabela 14 – Tabela de fatores para todas as cianobactérias.

Cianobactérias			Cianobactérias		
Variável	Factor 1	Factor 2	Variável	Factor 1	Factor 2
GEO	-0,1613	-0,5115	Oscill	-0,0128	0,0257
MIB	-0,5918	0,4262	PI	0,0275	-0,0248
Chrooco	-0,0626	0,3268	Apha	-0,0710	0,0128
Meris	-0,1482	0,0446	Pho	0,0235	0,0054
Microcys	-0,0549	-0,3958	Li	0,0431	-0,1547
Os	-0,2660	0,3971	Cyanog	0,0239	-0,3103
Psa	-0,3867	0,2333	Cuspi	0,0216	0,0007
Ps	-0,2152	0,3261	SXT	-0,2100	-0,1358
Me	-0,1484	-0,0868	Epi	0,0006	-0,0878
Gloeoca	0,0927	-0,1108	Snow	0,0176	-0,0993
Aph	-0,1155	0,0179	Dolic	-0,2294	-0,5215
week_Ph	0,0454	0,0334	Coelo	0,0111	-0,1477
Aphano	0,0459	-0,3165	Clorof-A	-0,4192	-0,2491
Pla	-0,1435	-0,3598	Cyl	-0,7411	-0,1079
GI	-0,5781	-0,1524	Cianobac	-0,8511	-0,0007

Utilizando-se também o software Statistica, realizou-se uma Regressão Multilinear com o MIB e com a Geosmina separadamente, com o intuito de se analisar os parâmetros mais significativos para a ocorrência de cada um desses compostos. Foi feita uma regressão multilinear entre a GEO e todos os parâmetros apresentados na Tabela 4 e com todos os microrganismos apresentados Tabela 5. O software indica quais parâmetros são mais significativos para a regressão (ou seja, parâmetros que possuem valor de $p < 0,05$). Em seguida, realizou-se outra regressão multilinear apenas com os parâmetros mais significativos para a concentração de geosmina. O

mesmo procedimento foi realizado com o MIB, os resultados são apresentados na Tabela 15.

Observou-se que os nutrientes presentes na água do reservatório Jundiaí não foram parâmetros significativos para nenhum dos compostos que causam gosto e odor na água. Isso pode ser explicado pelo fato de que este reservatório se encontra no estado eutrófico durante todo o período de coleta de dados (2008 a 2017). Sendo assim, a oferta de nutrientes é bastante elevada e quaisquer alterações nestes parâmetros não influenciaram as concentrações de MIB e geosmina.

Além disso, observou-se que os valores de coeficiente de determinação múltipla (R^2) obtidos variaram de 0,3388 a 0,3809, o que indica que o modelo linear foi capaz de explicar apenas uma pequena parte da variação dos dados. Entretanto, esse resultado também sugere que, apesar do fato de que as variáveis ambientais geralmente se correlacionam de forma não linear para o surgimento de fenômenos ambientais, ainda assim foi possível notar que existe uma certa correlação linear entre os parâmetros e as concentrações de MIB e geosmina. Portanto, esses parâmetros provavelmente possuem uma forte correlação não linear com essas substâncias que causam gosto e odor nos meios aquáticos.

Tabela 15 – Regressão Multilinear para cada substância que causa gosto e odor no reservatório Jundiaí.

	GEO	MIB
Variáveis Significativas ($p < 0,05$)	Microcys, Aphano, Pla, Gl, Epi, Dolic Clorof-A, OD, pH TAr, Turb, Cor Apar	Cyl, Meris, Microcys, Os, Psa, Ps, Aph, Gl, Dolic, Condut, OD, pH, Cor Apar ProfCole, Per H, Vazão
R^2	0,3430	0,3809
R^2 Ajustado	0,3388	0,3752

6. CONCLUSÃO

A análise dos resultados obtidos permite concluir que, no reservatório Jundiáí, os principais fatores que influenciam a produção e a liberação de 2-metilisoborneol e de geosmina no meio aquático foram as cianobactérias. Este reservatório pode ser classificado como um ambiente eutrófico com episódios de supereutrofização, o que significa que o excesso de nutrientes influenciou de maneira bastante significativa o aparecimento desses microrganismos. Dessa forma, os fatores abióticos (físico-químicos) não possuem forte correlação com as concentrações de MIB e de geosmina, o que foi observado a partir dos gráficos de Análise de Componentes Principais e das Matrizes de Correlação dos diversos fatores.

Porém, é importante observar que esses fatores podem influenciar de maneira distinta cada evento de gosto e odor, já que cada gênero e espécie de cianobactéria se comporta de maneira distinta. No geral, concluiu-se que os principais fatores abióticos que influenciam levemente as concentrações de MIB e geosmina foram o oxigênio dissolvido, o pH, a cor aparente e a clorofila-A (que está relacionada ao fitoplâncton presente no meio). Além disso, observou-se que a *Dolichospermum* e a *Pseudanabaena* foram os principais produtores de geosmina e MIB no reservatório em questão, respectivamente. Porém, não foram os únicos: observou-se uma relação complexa entre as diversas cianobactérias monitoradas, o que sugere que existe algum tipo de competição ou interação entre estes microrganismos que não favorece o aparecimento simultâneo dos produtores de geosmina e de MIB. Além disso, para melhor compreensão do fenômeno que ocorre no reservatório, ressalta-se a importância de se monitorar outros microrganismos como diatomáceas e actinomicetos, já que também são produtores destes compostos e podem exercer influência em eventos de gosto e odor.

Como o tratamento da água afetada pelo MIB e geosmina é uma dificuldade, cada vez mais se faz necessário o uso de ferramentas capazes de prever esses acontecimentos. O uso de Análise de Componentes Principais pode ser aliado a modelos lineares e não lineares para a previsão desses compostos em águas de abastecimento. Sendo assim, a continuidade deste trabalho consistirá na

implementação de um modelo de Regressão Não Linear de Redes Neurais, a partir dos resultados obtidos neste estudo. Dessa forma, é possível melhorar a qualidade de um dos recursos naturais de maior valor para a sociedade: a água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALGHANMI, H. A.; ALKAM, F. M.; AL-TAEE, M. M. Effect of light and temperature on new cyanobacteria producers for geosmin and 2-methylisoborneol. p. 319–328, 2018.
- ANTONOPOULOU, M., KONSTANTINOU, I. AOPs Methods for the Removal of Taste and Odor Compounds. In: ANTONIO GIL, LUIS ALEJANDRO GALEANO, M. Á. V. (Ed.). . **Applications of Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Drinking Water Treatment**. [s.l.] Springer, Cham, 2017. p. 179–210.
- ANTONOPOULOU, M. et al. A review on advanced oxidation processes for the removal of taste and odor compounds from aqueous media. **Water Research**, v. 53, p. 215–234, 2014.
- ASQUITH, E. et al. Distribution, abundance and activity of geosmin and 2-methylisoborneol-producing *Streptomyces* in drinking water reservoirs. **Water Research**, v. 145, p. 30–38, 2018.
- BASILIO, P.; BARROS, C. Eutrofização em reservatórios – Estudo de caso: reservatório de Rio Bonito (ES). p. 275–282, 2014.
- BERTONE, E.; HALLORAN, K. O. Analysis and Modelling of Taste and Odour Events in a Shallow Subtropical Reservoir. p. 7–10, 2016.
- BERTONE, E.; O'HALLORAN, K. Analysis and Modelling of Taste and Odour Events in a Shallow Subtropical Reservoir. **Environments**, v. 3, n. 4, p. 22, 2016.
- BREHERET, S. et al. Geosmin, a Sesquiterpenoid Compound Responsible for the Musty-Earthy Odor of *Cortinarius herculeus*, *Cystoderma amianthinum*, and *Cy. carcharias*. **Mycologia**, v. 91, n. 1, p. 117–120, 1999.
- CETESB. **Qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo**. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2017.
- CHUNG, S. W.; CHONG, S. A.; PARK, H. S. Development and Applications of a Predictive Model for Geosmin in North Han River, Korea. **Procedia Engineering**, v. 154, p. 521–528, 2016.
- COOK, D.; NEWCOMBE, G.; SZTAJNBOK, P. The application of powdered activated carbon for MIB and geosmin removal: Predicting PAC doses in four raw waters. **Water Research**, v. 35, n. 5, p. 1325–1333, 2001.
- DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Sistema Produtor Alto Tietê e as Barragens do DAEE: Memória do DAEE**. Disponível em: <<https://memoriadodaee.wordpress.com/2012/11/07/sistema-produtor-alto-tiete-e-as-barragens-do-daee/>>. Acesso em: 26 maio. 2019.
- DIONIGI, C. D.; AHTEN, T. S.; WARTELLE, L. H. Effects of several metals on spore, biomass, and geosmin production by *Streptomyces tendae* and *Penicillium expansum*. **Journal of Industrial Microbiology**, v. 17, n. April, p. 84–88, 1996.
- DOEDERER, K.; GALE, D.; KELLER, J. Effective removal of MIB and geosmin using

MBBR for drinking water treatment. **Water Research**, v. 149, p. 440–447, 2019.

DZIALOWSKI, A. R. et al. Development of predictive models for geosmin-related taste and odor in Kansas, USA, drinking water reservoirs. **Water Research**, v. 43, n. 11, p. 2829–2840, 2009.

GRAHAM, J. L. et al. Cyanotoxin Mixtures and Taste-and-Odor Compounds in Cyanobacterial Blooms from the Midwestern United States. p. 7361–7368, 2010.

GUO, Q. et al. Simultaneous removal of multiple odorants from source water suffering from septic and musty odors: Verification in a full-scale water treatment plant with ozonation. **Water Research**, v. 100, p. 1–6, 2016.

HATHURUSINGHA, P. I.; DAVEY, K. R. A predictive model for taste taint accumulation in Recirculating Aquaculture Systems (RAS) farmed-fish - demonstrated with geosmin (GSM) and 2-methylisoborneol (MIB). **Ecological Modelling**, v. 291, p. 242–249, 2014.

HATHURUSINGHA, P. I.; DAVEY, K. R. Experimental validation of a time-dependent model for chemical taste taint accumulation as geosmin (GSM) and 2-methylisoborneol (MIB) in commercial RAS farmed barramundi (*Lates calcarifer*). **Ecological Modelling**, v. 340, p. 17–27, 2016.

HAYES, S. J.; HAYES, K. P.; ROBINSON, B. S. Geosmin as an Odorous Metabolite in Cultures of a Free-living Amoeba, *Vannella* species (*Gymnamoebia*, *Vannellidae*). **Journal of Protozoology**, v. 38, n. 1, p. 44–47, 1991.

HO, L. et al. Biodegradation of multiple cyanobacterial metabolites in drinking water supplies. **Chemosphere**, v. 87, n. 10, p. 1149–1154, 2012.

HUANG, X. et al. The predominant phytoplankton of *Pseudoanabaena* holding specific biosynthesis gene-derived occurrence of 2-MIB in a drinking water reservoir. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 19, p. 19134–19142, 2018.

IZAGUIRRE, G.; TAYLOR, W. D. A *Pseudanabaena* species from Castaic Lake, California, that produces 2-methylisoborneol. **Water Research**, v. 32, n. 5, p. 1673–1677, 1998.

IZAGUIRRE, G.; TAYLOR, W. D. Geosmin and MIB events in a new reservoir in southern California. p. 9–14, 2007.

JÄHNICHEN, S. et al. Spatio-temporal distribution of cell-bound and dissolved geosmin in Wahnbach Reservoir: Causes and potential odour nuisances in raw water. **Water Research**, v. 45, n. 16, p. 4973–4982, 2011.

JÜTTNER, F.; WATSON, S. B. Biochemical and ecological control of geosmin and 2-methylisoborneol in source waters. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 73, n. 14, p. 4395–4406, 2007.

KEHOE, M. J.; CHUN, K. P.; BAULCH, H. M. Who Smells? Forecasting Taste and Odor in a Drinking Water Reservoir. **Environmental Science and Technology**, v. 49, n. 18, p. 10984–10992, 2015.

- KIM, T. K. et al. Degradation mechanisms of geosmin and 2-MIB during UV photolysis and UV/chlorine reactions. **Chemosphere**, v. 162, p. 157–164, 2016.
- KUTOVAYA, O. A.; WATSON, S. B. Development and application of a molecular assay to detect and monitor geosmin-producing cyanobacteria and actinomycetes in the Great Lakes. **Journal of Great Lakes Research**, v. 40, n. 2, p. 404–414, 2014.
- LAMPARELLI, M. C. **Graus de trofia em corpos d' água do Estado de São Paulo: Avaliação dos métodos de monitoramento**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2004.
- LARSEN, T. O.; FRISVAD, J. C. Characterization of volatile metabolites from 47 *Penicillium* taxa. **Mycological Research**, v. 99, n. 10, p. 1153–1166, 1995.
- LEE, J. et al. The role of algae and cyanobacteria in the production and release of odorants in water. **Environmental Pollution**, v. 227, p. 252–262, 2017.
- LI, L. et al. Kinetics and mechanism of *Pseudoanabaena* cell inactivation, 2-MIB release and degradation under exposure of ozone, chlorine and permanganate. **Water Research**, v. 147, p. 422–428, 2018.
- LI, Z. et al. Earthy odor compounds production and loss in three cyanobacterial cultures. **Water Research**, v. 46, n. 16, p. 5165–5173, 2012.
- LIATO, V.; AÏDER, M. Geosmin as a source of the earthy-musty smell in fruits, vegetables and water: Origins, impact on foods and water, and review of the removing techniques. **Chemosphere**, v. 181, p. 9–18, 2017.
- LIU, H. et al. Occurrence and Emergency Response of 2-Methylisoborneol and Geosmin in a Large Shallow Drinking Water Reservoir. **Clean - Soil, Air, Water**, v. 44, n. 1, p. 63–71, 2016.
- MA, L. et al. Degradation of geosmin and 2-methylisoborneol in water with UV/chlorine: Influencing factors, reactive species, and possible pathways. **Chemosphere**, v. 211, p. 1166–1175, 2018.
- NIIYAMA, Y. et al. *Pseudanabaena foetida* sp. nov. and *P. subfoetida* sp. nov. (cyanophyta/ cyanobacteria) producing 2-methylisoborneol from Japan. **Fottea**, v. 16, n. 1, p. 1–11, 2016.
- OLSEN, B. K. et al. Nutrient enrichment and vertical mixing mediate 2-methylisoborneol and geosmin concentrations in a drinking water reservoir. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 17, n. 2, p. 500–507, 2017.
- OLSEN, B. K.; CHISLOCK, M. F.; WILSON, A. E. Eutrophication mediates a common off-flavor compound, 2-methylisoborneol, in a drinking water reservoir. **Water Research**, v. 92, p. 228–234, 2016.
- PARINET, J.; RODRIGUEZ, M. J.; SÉRODES, J. Influence of water quality on the presence of off-flavour compounds (geosmin and 2-methylisoborneol). **Water Research**, v. 44, n. 20, p. 5847–5856, 2010.
- PARINET, J.; RODRIGUEZ, M. J.; SÉRODES, J. B. Modelling geosmin concentrations in three sources of raw water in Quebec, Canada. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 185, n. 1, p. 95–111, 2013.

PARK, J. et al. Oxidation of geosmin and 2-methylisoborneol by the photo-Fenton process : Kinetics , degradation intermediates , and the removal of microcystin-LR and trihalomethane from Nak-Dong River water , South Korea. **Chemical Engineering Journal**, v. 313, p. 345–354, 2017.

PERKINS, R. G. et al. Managing taste and odour metabolite production in drinking water reservoirs: The importance of ammonium as a key nutrient trigger. **Journal of Environmental Management**, v. 244, n. April, p. 276–284, 2019.

PORTAL G1. **Mogi das Cruzes e Suzano: Nível do Sistema Alto Tietê registra nova alta neste domingo**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/sp/mogi-das-cruzes-suzano/noticia/2017/03/nivel-do-sistema-alto-tiete-registra-nova-alta-neste-domingo.html>>. Acesso em: 26 maio. 2019.

SAADOUN, I. M. K.; SCHRADER, K. K.; BLEVINS, W. T. Environmental and nutritional factors affecting geosmin synthesis by *Anabaena* sp. **Water Research**, v. 35, n. 5, p. 1209–1218, 2001.

SABESP. **Região Metropolitana de São Paulo**. Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=31>>. Acesso em: 26 maio. 2019.

SCHRADER, K. Geosmin-producing species of *Streptomyces* and *Lyngbya* from aquaculture ponds1. n. 1989, 1993.

SCHRADER, K. K. et al. Novel derivatives of 9,10-anthraquinone are selective algicides against the musty-odor cyanobacterium *Oscillatoria perornata*. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 69, n. 9, p. 5319–5327, 2003.

SCHRADER, K. K.; BLEVINS, W. T. Effects of carbon source , phosphorus concentration , and several micronutrients on biomass and geosmin production by *Streptomyces halstedii*. 2001.

SCHRADER, K. K.; GREEN, B. W.; PERSCHBACHER, P. W. Aquacultural Engineering Development of phytoplankton communities and common off-flavors in a biofloc technology system used for the culture of channel catfish (*Ictalurus punctatus*). **Aquacultural Engineering**, v. 45, n. 3, p. 118–126, 2011.

SRINIVASAN, R.; SORIAL, G. A. Treatment of taste and odor causing compounds 2-methyl isoborneol and geosmin in drinking water: A critical review. **Journal of Environmental Sciences**, v. 23, n. 1, p. 1–13, 2011.

SU, M. et al. Establishment of quantitative PCR methods for the quantification of geosmin-producing potential and *Anabaena* sp. in freshwater systems. **Water Research**, v. 47, n. 10, p. 3444–3454, 2013.

SU, M. et al. MIB-producing cyanobacteria (*Planktothrix* sp.) in a drinking water reservoir: Distribution and odor producing potential. **Water Research**, v. 68, p. 444–453, 2015.

SU, M. et al. Succession and interaction of surface and subsurface cyanobacterial blooms in oligotrophic/mesotrophic reservoirs: A case study in Miyun Reservoir. **Science of the Total Environment**, v. 649, p. 1553–1562, 2019.

SUGIURA, N. et al. SIGNIFICANCE OF ATTACHED CYANOBACTERIA RELEVANT TO THE OCCURRENCE OF MUSTY ODOR IN. v. 32, n. 12, p. 3549–3554, 1998.

SUGIURA, N. et al. Assessment for the complicated occurrence of nuisance odours from phytoplankton and environmental factors in a eutrophic lake. p. 195–201, 2004.

SUN, D. et al. Identification of causative compounds and microorganisms for musty odor occurrence in the Huangpu River, China. **Journal of Environmental Sciences (China)**, v. 25, n. 3, p. 460–465, 2013.

SUURNÄKKI, S. et al. Identification of geosmin and 2-methylisoborneol in cyanobacteria and molecular detection methods for the producers of these compounds. **Water Research**, v. 68, n. Viikinkaari 9, p. 56–66, 2015.

TSAO, H. W. et al. Monitoring of geosmin producing *Anabaena circinalis* using quantitative PCR. **Water Research**, v. 49, p. 416–425, 2014.

WANG, R. et al. Seasonal occurrence and species specificity of fishy and musty odor in Huajiang Reservoir in winter, China. **Water Resources and Industry**, v. 11, p. 13–26, 2015a.

WANG, Z. et al. Isolation and characterization of a new reported cyanobacterium *Leptolyngbya bijugata* coproducing odorous geosmin and 2-methylisoborneol. 2015b.

WANG, Z.; LI, R. Effects of light and temperature on the odor production of 2-methylisoborneol-producing *Pseudanabaena* sp. and geosmin-producing *Anabaena ucrainica* (cyanobacteria). **Biochemical Systematics and Ecology**, v. 58, n. 7, p. 219–226, 2015.

WATSON, S. B. et al. Biochemistry and genetics of taste- and odor-producing cyanobacteria. **Harmful Algae**, v. 54, p. 112–127, 2016.

WERT, E. C. et al. Effect of oxidant exposure on the release of intracellular microcystin, MIB, and geosmin from three cyanobacteria species. **Water Research**, v. 52, p. 251–259, 2014.

WOOD, S.; WILLIAMS, S. T.; WHITE, W. R. **Microbes as a source of earthy flavours in potable water - A review** *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2001.

XU, H. et al. Impact of copper sulphate, potassium permanganate, and hydrogen peroxide on *Pseudanabaena galeata* cell integrity, release and degradation of 2-methylisoborneol. **Water Research**, v. 157, p. 64–73, 2019.

XUWEI, D. et al. The relationships between odors and environmental factors at bloom and non-bloom area in Lake Taihu, China. **Chemosphere**, v. 218, p. 569–576, 2019.

YUAN, R. et al. Effect of the wavelength on the pathways of 2-MIB and geosmin photocatalytic oxidation in the presence of Fe-N co-doped TiO₂. v. 353, n. April, p. 319–328, 2018.

ZAMYADI, A. et al. Fate of geosmin and 2-methylisoborneol in full-scale water treatment plants. **Water Research**, v. 83, p. 171–183, 2015.

ZHANG, T. et al. Identification and expression analysis of the gene associated with geosmin production in *Lyngbya kuetzingii* UTEX 1547 (cyanobacteria). **Harmful Algae**, v. 39, p. 127–133, 2014.